



การศึกษาและพัฒนาเครื่องมือทดสอบการเฉือนแบบตรงอย่างง่าย
Study and Development for Direct Simple Shear Apparatus

วาริส บัวขาว

Waris Buakhaw

วิทยานิพนธ์นี้เป็นส่วนหนึ่งของการศึกษาตามหลักสูตรปริญญา
วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิตสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

**A Thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of
Master of Engineering in Civil Engineering
Prince of Songkla University**

2558

ลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ชื่อวิทยานิพนธ์ การศึกษาและพัฒนาเครื่องมือทดสอบการเลื่อนแบบตรงอย่างง่าย
ผู้เขียน นายวาริส บัวขาว
สาขาวิชา วิศวกรรมโยธา

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์หลัก	คณะกรรมการสอบ
..... (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนันท์ ชูบุญปลการ)ประธานกรรมการ (รองศาสตราจารย์ ดร.ชนิด เฉลิมยานนท์)
กรรมการ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนันท์ ชูบุญปลการ)
กรรมการ (ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิติเดช สันติชัยอนันต์)

บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อนุมัติให้บัณฑิตวิทยาลัยฉบับนี้เป็น
ส่วนหนึ่งของการศึกษา ตามหลักสูตร ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมโยธา

.....
(รองศาสตราจารย์ ดร.ธีระพล ศรีชนะ)

คณบดีบัณฑิตวิทยาลัย

(3)

ขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้มาจากการศึกษาวิจัยของนักศึกษาเอง และได้แสดงความขอบคุณบุคคลที่มีส่วนช่วยเหลือแล้ว

ลงชื่อ.....

(ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนนท์ ชูบุญการ)

อาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์

ลงชื่อ.....

(นายวาริส บัวขาว)

นักศึกษา

(4)

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า ผลงานวิจัยนี้ไม่เคยเป็นส่วนหนึ่งในการอนุมัติปริญญาในระดับใดมาก่อน และ
ไม่ได้ถูกใช้ในการยื่นขออนุมัติปริญญาในขณะนี้

ลงชื่อ.....

(นายวาริส บัวขาว)

นักศึกษา

ชื่อวิทยานิพนธ์	การศึกษาและพัฒนาเครื่องมือทดสอบการเหือนแบบตรงอย่างง่าย
ผู้เขียน	นายวาริส บัวขาว
สาขาวิชา	วิศวกรรมโยธา (วิศวกรรมธรณีเทคนิค)
ปีการศึกษา	2557

บทคัดย่อ

เป้าหมายการศึกษางานวิจัยครั้งนี้เพื่อพัฒนาเครื่องมือทดสอบด้วยวิธีการทดสอบการเหือนแบบตรงอย่างง่ายสำหรับการเหือนทางเดียว ทำการทดสอบกำลังรับแรงเหือนของตัวอย่างดินด้วยเงื่อนไขไม่ระบายน้ำโดยใช้ตัวอย่างดินเหนียวอ่อนปากพั้งที่เก็บที่ความลึก 5.5 – 12.5 เมตร ตัวอย่างดินถูกเตรียมให้อยู่ในสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำก่อนเริ่มต้นกระบวนการอัดตัวคายน้ำตัวอย่างดินอัดแน่นปกติ (NC) 3 ตัวอย่าง ที่ระดับความเค้นในแนวดิ่ง เท่ากับ 100 150 และ 250 kPa ตามลำดับ และทดสอบตัวอย่างดินอัดแน่นกว่าปกติ (OC) 4 ตัวอย่าง มีอัตราส่วนการอัดตัวแน่นเกินตัว (OCR) เท่ากับ 1 2 4 และ 8 ตามลำดับ ถูกเหือนแบบไม่ระบายน้ำด้วยอัตราความเครียดเหือนเท่ากับ 5 % จนกระทั่งความเครียดเหือนเท่ากับ 20 %

ผลการทดสอบถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่ากำลังรับแรงเหือนแบบไม่ระบายน้ำที่ทดสอบด้วยวิธีแรงอัดสามแกนของตัวอย่างดินเหนียวปากพั้งเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องทดสอบแรงเหือนแบบตรงอย่างง่ายที่ได้พัฒนาวิธี SHANSEP ได้ถูกนำมาใช้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ของกำลังรับแรงเหือนแบบไม่ระบายน้ำของดินเหนียวปากพั้งด้วย

จากการตรวจสอบความถูกต้องของเครื่องทดสอบแรงเหือนอย่างง่ายที่พัฒนา พบว่าพฤติกรรมการรับแรงเหือนแบบไม่ระบายน้ำที่อัตราการเหือนเดียวกันระหว่างผลการทดสอบกำลังรับแรงเหือนอย่างง่ายและวิธีการทดสอบแรงอัดสามแกนของตัวอย่างดินเหนียวปากพั้งมีความสอดคล้องกัน อย่างไรก็ตาม ผลการทดสอบค่ากำลังรับแรงเหือนแบบไม่ระบายน้ำด้วยวิธีแรงเหือนอย่างง่ายมีค่าที่ต่ำกว่า ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎี สุดท้ายงานวิจัยนี้ได้ชี้ให้เห็นว่าเครื่องทดสอบการเหือนแบบตรงอย่างง่ายที่พัฒนาขึ้นสามารถทำการทดสอบได้อย่างมีประสิทธิภาพและให้ค่ากำลังรับแรงเหือนแบบไม่ระบายน้ำที่เหมาะสมน่าเชื่อถือ

คำหลัก : การทดสอบแรงเหือนแบบตรงอย่างง่าย, กำลังรับแรงเหือนแบบไม่ระบายน้ำ, อัตราการอัดแน่นเกินตัว,

Thesis Title	Study and Development for Direct Simple Shear Apparatus
Author	Mr. Waris Buakhaw
Major Program	Civil Engineering (Geotechnical Engineering)
Academic Year	2557

ABSTRACT

The aim of this research study is to develop monotonic direct simple shear apparatus. Shear strength test were tested on Pakpanang clay collected at 5.5 – 12.5 m of soil depth under consolidated undrained condition. Soil samples were prepared as saturated condition before consolidation process. Three normally consolidated (NC) samples with vertical stress of 100, 150 and 250 kPa and four over-consolidated (OC) samples with 1, 2, 4 and 8 of OCR were monotonically sheared at 5 % of shearing rate until shear strain reach 20%.

The results were compared with undrained shear strength of Pakpanang clay obtained by triaxial testing results for validity purpose of direct simple shear apparatus. SHANSEP method was also employed to estimate the undrained shear strength parameters of Pakpanang clay.

Verification results indicated that the undrained shear strength behavior at the same strain rate between direct simple shear and triaxial testing results was well comparable. However, the undrained shear strength of direct simple shear was lower than the triaxial result that appropriated with shear strength theory. Eventually, the developed direct simple shear apparatus can reliably provide result of the undrained shear strength.

Keywords : Direct simple shear, undrained shear strength, over consolidation ratio

สารบัญ

สารบัญ	หน้า
รายการตาราง	(11)
รายการภาพประกอบ	(12)
บทที่	
1	บทนำ
1.1	ความสำคัญและที่มาของการวิจัย 1
1.2	วัตถุประสงค์ของการวิจัย 2
1.3	ขอบเขตของงานวิจัย 2
1.4	ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ 3
2	แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง
2.1	บทนำ 4
2.1.1	ประวัติเครื่องมือการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่าย 6
2.2	ทฤษฎีและสมมติฐาน 9
2.2.1	สมมติฐานของการวิบัติของดิน 9
2.2.2	สมมติฐานของการวิบัติของดินที่ใช้กับเครื่องมือทดสอบกำลังรับแรง เฉือนทางตรงอย่างง่าย 10
2.2.3	สมมติฐานเกี่ยวกับความสัมพันธ์ของความเค้นและความเครียด 11
2.2.4	สมมติฐานเกี่ยวกับการทดสอบแบบปริมาตรคงที่ 13
2.3	ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนอย่างง่ายแบบทางเดียว 14
2.4	ดินเหนียวอ่อนปากพนัง 17
2.4.1	คุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวอ่อนปากพนัง 17
2.4.2	คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนปากพนัง 19
2.4.2.1	ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบหนึ่งมิติ 19
2.4.2.2	ผลการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำ 24

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
2.5 การทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติทางพลศาสตร์ของดินด้วยเครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทางตรงอย่างง่าย	30
2.6 ทฤษฎี SHANSEP	33
2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง	36
3 วิธีดำเนินการวิจัย	
3.1 การออกแบบเครื่องมืออุปกรณ์การทดสอบการเฉือนแบบตรงอย่างง่าย	42
3.1.1 การออกแบบชุดอุปกรณ์การเตรียมตัวอย่าง	42
3.1.1.1 แทนเตรียมตัวอย่าง	43
3.1.1.2 อุปกรณ์ตัดตัวอย่าง	44
3.1.1.3 อุปกรณ์ดันตัวอย่างออกจากอุปกรณ์ตัดตัวอย่าง	44
3.1.1.4 อุปกรณ์สวมยางหุ้มตัวอย่าง	45
3.1.2 การออกแบบเครื่องทดสอบการเฉือนแบบตรงอย่างง่าย	45
3.1.3 อุปกรณ์บันทึกข้อมูลและเครื่องมือวัดสำหรับเครื่องทดสอบการเฉือนแบบตรงอย่างง่าย	49
3.2 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ	51
3.3 การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม	51
3.3.1 การทดสอบหาความเค้นประสิทธิผลสูงสุดในอดีต	51
3.3.2 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของเมนเบรนและสตัคริงด้วยเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนแบบตรงอย่างง่าย	52
3.3.3 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินด้วยเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนแบบตรงอย่างง่าย	52
3.3.3.1 การเตรียมตัวอย่างที่จะใช้ในการทดสอบ	53
3.3.3.2 การทำให้ตัวอย่างดินอิ่มตัวด้วยน้ำ	56
3.3.3.3 การอัดตัวคายน้ำ	58

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
3.4 การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องมืออุปกรณ์การทดสอบการเหือนแบบตรง	60
3.5 .ประมาณกำลังรับแรงเหือนทางเดียวอย่างง่ายแบบไม่ระบายน้ำด้วยวิธี SHANSEP	60
4 ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผลการศึกษา	
4.1 ผลการออกแบบเครื่องมืออุปกรณ์การทดสอบการเหือนแบบตรงอย่างง่าย	61
4.1.1 ผลการออกแบบชุดอุปกรณ์การเตรียมตัวอย่าง	61
4.1.2 ผลการออกแบบเครื่องทดสอบการเหือนแบบตรงอย่างง่าย	62
4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ	64
4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม	65
4.3.1 ผลการทดสอบหาความเค้นประสิทธิผลสูงสุดในอดีต	65
4.3.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเหือนของเมนเบรนและสตัคริงด้วยเครื่องมือทดสอบด้วยเครื่องมือทดสอบแรงเหือนแบบตรงอย่างง่าย	66
4.3.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเหือนของดินด้วยเครื่องมือทดสอบแรงเหือนแบบตรงอย่างง่าย	67
4.4 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องมืออุปกรณ์การทดสอบการเหือนแบบตรง	75
4.5 ผลการประมาณกำลังรับแรงเหือนทางเดียวอย่างง่ายแบบไม่ระบายน้ำด้วยวิธี SHANSEP	76
5 สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ	
5.1 สรุปผลพัฒนาเครื่องมือทดสอบแรงเหือนทางตรงอย่างง่ายสำหรับการเหือนทางเดียว	78
5.2 สรุปผลการทดสอบแรงเหือนทางตรงอย่างง่ายแบบทางเดียว	79
5.3 สรุปผลการทดสอบความถูกต้องของเครื่องทดสอบที่พัฒนาขึ้นมา	79
5.4 ข้อเสนอแนะ	80

สารบัญ (ต่อ)

	หน้า
บรรณานุกรม	81
ภาคผนวก	83
ก. ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบหนึ่งมิติ	84
ข. ผลการทดสอบแรงเฉือนแบบตรงอย่างง่าย	98
ค. คู่มือการใช้เครื่องทดสอบแรงเฉือนแบบตรงอย่างง่าย (Direct Simple Shear Apparatus)	108
การเผยแพร่ผลงานวิทยานิพนธ์	133
ประวัติผู้เขียน	144

รายการตาราง

ตารางที่		หน้า
2.1	แสดงสาระสำคัญของการทดสอบกำลังรับแรงเฉือน โดยทั่วไป	6
2.2	คุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวปากพั้ง	18
2.3	ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบหนึ่งมิติ	19
3.1	แสดงการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดิน	51
3.2	วิธีการเตรียมตัวอย่างทดสอบ	53
3.3	แสดงตัวอย่างการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบทางเดียว	59
4.1	ค่าคุณสมบัติทางวิศวกรรมเบื้องต้นของตัวอย่างทดสอบ	64
4.2	ค่าความเค้นเบี่ยงสูงสุดที่ทำบรรทัดฐานด้วยค่าความเค้นประสิทธิผลก่อนเฉือน	75

รายการภาพประกอบ

รูปที่		หน้า
2.1	ความสัมพันธ์ของการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในห้องปฏิบัติการกับกำลังรับแรงเฉือนของดินในสนาม	5
2.2	เปรียบเทียบระนาบการวิบัติของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนทางตรง (Direct Shear) และทางตรงอย่างง่าย (Simple Shear)	5
2.3	หน้าตัดของเครื่องมือการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายของ Royal Swedish Geotechnical Institute	7
2.4	อุปกรณ์ทดสอบแรงเฉือนอย่างง่ายของมหาวิทยาลัยเคมบริดจ์แบบ Mk7 (a) รูปตัดของเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายของมหาวิทยาลัยเคมบริดจ์	8
2.5	การวิบัติของดินตามสมมุติฐานของมอร์-คูลอมป์	9
2.6	การหมุนวงกลมมอร์-คูลอมป์เพื่อให้ปรากฏความเค้นเฉือนสูงสุด	10
2.7	การหมุนวงกลมมอร์-คูลอมป์เพื่อให้ปรากฏความเค้นเฉือนสูงสุด	11
2.8	การเปรียบเทียบระหว่างสถานะของความเค้นในตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายกับสภาพที่เกิดขึ้นจริง	11
2.9	ความเค้นยึดหยุ่นในอุปกรณ์การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายของมหาวิทยาลัยเคมบริดจ์	12
2.10	การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายของบริษัท	12
2.11	การเปรียบเทียบผลการทดสอบแบบปริมาตรคงที่และการทดสอบแบบไม่ระบายน้ำที่มีการวัดแรงดันน้ำส่วนเกิน	14
2.12	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากำลังรับแรงเฉือนต่อความเค้นประสิทธิผลในแนวตั้งเปรียบเทียบกับค่า ค่าอัตราส่วนการอัดตัวแน่นเกินตัว ของการการทดสอบ CK_0 UDSS ในดินเหนียวอัดตัวแน่นมากกว่าปกติ จำนวน 5 ชนิด	15
2.13	กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากำลังรับแรงเฉือนต่อความเค้นประสิทธิผลในแนวตั้งเปรียบเทียบกับค่า ค่าอัตราส่วนการอัดตัวแน่นเกินตัว ของการการทดสอบ CK_0 UDSS ในและการทดสอบ CIUC ของดินเหนียวกรุงเทพฯ	16
2.14	การทดสอบหาการกระจายตัวของอนุภาคของเม็ดดินที่การทดสอบ 3 ตัวอย่าง	18
2.15	เส้นโค้งการอัดตัวคายน้ำของตัวอย่างดินเหนียวปากพองจำนวน 2 ตัวอย่าง	20
2.16	ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำที่ได้จากการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบหนึ่งมิติ	21

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
2.17	อัตราความเครียดตามแนวแกนเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบหนึ่งมิติจำนวน 2 ตัวอย่าง	23
2.18	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนที่ทำการบรรทัดฐานด้วยค่าความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ยกับค่าอัตราความเครียดที่แตกต่างกัน	26
2.19	ความสัมพันธ์ของแรงดันน้ำส่วนเกินที่ทำการบรรทัดฐานด้วยค่าความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ยกับค่าอัตราความเครียดที่แตกต่างกัน	29
2.20	แสดงส่วนประกอบของชุดเครื่องมือการเตรียมตัวอย่าง	31
2.21	แสดงขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างสำหรับเครื่องทดสอบของบริษัท GEONOR	32
2.22	หลักการของวิธี SHANSEP	34
2.23	การ Normalization ของดินไร้พันธะเชื่อมประสาน	34
2.24	Normalized shear stress จากผลทดสอบ CU Direct shear test	35
2.25	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับค่าการอัดตัวแน่นเกินตัว (SHANSEP)	36
2.26	แสดง Normalized Stress Path ของการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบทางเดียว	38
2.27	ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาตรภายใต้ความเค้นในแนวตั้ง เท่ากับ 100 kPa	39
2.28	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาตรภายใต้ความเค้นในแนวตั้ง เท่ากับ 200 kPa	39
2.29	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาตรภายใต้ความเค้นในแนวตั้ง เท่ากับ 300 kPa	40
3.1	แสดงแผนภูมิการดำเนินงานวิจัย	41
3.2	ชุดอุปกรณ์การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบการเฉือนแบบตรงอย่างง่าย	42
3.3	แสดงยาง(Membrane)และสตัคคิง(Stack Rings) สำหรับเตรียมตัวอย่าง	43
3.4	แสดงแบบแท่นเตรียมตัวอย่าง	43
3.5	แสดงอุปกรณ์ตัดตัวอย่าง	44
3.6	แสดงชุดดินตัวอย่างดิน	44

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
3.7	แสดงอุปกรณ์สวมยางหุ้มตัวอย่างดิน	45
3.8	แสดงภาพร่างของเครื่องทดสอบการเฉือนแบบตรงอย่างง่าย	46
3.9	แสดงเครื่องทดสอบการเฉือนแบบตรงอย่างง่ายมุมมองด้านหน้า	47
3.10	แสดงเครื่องทดสอบการเฉือนแบบตรงอย่างง่ายมุมมองด้านบน	47
3.11	แสดงเครื่องทดสอบการเฉือนแบบตรงอย่างง่ายมุมมองด้านซ้ายและด้านขวา	48
3.12	แสดงหลักการการทำงานของเครื่องทดสอบการเฉือนแบบตรงอย่างง่าย	48
3.13	แสดงระบบการบันทึกและรวบรวมข้อมูลสำหรับการทดสอบการเฉือนแบบตรงอย่างง่าย	49
3.14	แผนภาพการติดตั้งระบบการตรวจวัดแรงดันน้ำ	50
3.15	ภาพจำลองการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของยางและสตัคริง	52
3.16	ภาพจำลองตัวอย่างที่เตรียมดินที่พร้อมทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินด้วยเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนแบบตรงอย่างง่าย	53
3.17	ภาพจำลองการทำให้ตัวอย่างดินอิ่มตัวด้วยน้ำ(Saturation)	57
3.18	ขั้นตอนการทำให้ตัวอย่างดินอิ่มตัวด้วยน้ำ(Saturation)	57
3.19	แสดงการจำลองการเพิ่มความเค้นในแนวตั้ง(σ'_{vc}) ของการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของตัวอย่างทดสอบ	58
3.20	ภาพจำลองระบบการอัดตัวคายน้ำของตัวอย่างทดสอบ	59
4.1	แสดงตัวอย่างที่เตรียมวางบนแท่นทดสอบการเฉือนแบบตรงอย่างง่าย	61
4.2	แสดงชุดอุปกรณ์การสร้างแรงดันคงที่	62
4.3	แสดงการติดตั้งระบบสำหรับทดสอบการเฉือนแบบตรงอย่างง่าย	63
4.4	การติดตั้งอุปกรณ์การวัดแรงดันน้ำในมวลดินสำหรับทดสอบการเฉือนแบบตรงอย่างง่าย	63
4.5	เส้นโค้งการอัดตัวคายน้ำของตัวอย่างดินเหนียวปากพั้ง ความลึก 7 – 7.5 เมตร	65
4.6	การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของเมนเบรนและสตัคริง	66
4.7	ผลการทดสอบการเฉือนแบบตรงอย่างง่ายของเมนเบรนและสตัคริง	67
4.8	ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายที่อัตราส่วนการอัดตัวแน่นปกติ	70

รายการภาพประกอบ (ต่อ)

รูปที่		หน้า
4.9	การ Normalized ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายที่อัตราส่วนการอัดตัวแน่นปกติ	71
4.10	ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายที่อัตราส่วนการอัดตัวแน่นเกินตัว	73
4.11	Normalized ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่าย ที่อัตราส่วนการอัดตัวแน่นเกินตัว	74
4.12	ผลทดสอบด้วยวิธีแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายกับเครื่องทดสอบที่พัฒนาขึ้นมา กับผลการทดสอบแรงอัดสามแกนของศิริพร(2556)	76
4.13	กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับค่าการอัดตัวแน่นเกินตัว (SHANSEP)	77

บทที่ 1

บทนำ

1.1 ความสำคัญและที่มาของการวิจัย

ปัญหาทางวิศวกรรมธรณี สามารถแบ่งเป็นสองหมวดปัญหา คือ ปัญหาเกี่ยวกับความสมดุลหรือความมั่นคงของดิน (Stability Problem) และปัญหาการเคลื่อนตัวของดิน (Displacement Problem) สำหรับปัญหาที่เกี่ยวกับความสมดุลหรือความมั่นคงของดินนั้น สิ่งที่วิศวกรต้องพิจารณาการวิบัติที่เกิดขึ้นจากดินที่ต้องรับน้ำหนักหรือแรงกระทำเกินความสามารถที่จะรับได้และเกิดจากความไม่มีเสถียรภาพของโครงสร้างดิน เช่น การพังทลายของเขื่อน การพังทลายของไหล่ถนนและคันคลอง เป็นต้น ส่วนปัญหาที่เกิดจากการเคลื่อนตัวของดินความเสียหายที่เกิดขึ้นเรียกว่า การพิบัติจากการทรุดตัวและการเคลื่อนตัวของดิน เช่น การทรุดตัวของฐานรากและการวิบัติของกำแพงกันดิน ในการที่จะศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อการพิบัติของดินจะต้องจำลองสภาพการพิบัติในห้องปฏิบัติการเพื่อทำการศึกษาถึงพฤติกรรมและองค์ประกอบของการพิบัติตลอดจนพารามิเตอร์ต่างๆ เพื่อใช้ในการออกแบบ แต่ในงานทางด้านวิศวกรรมธรณีเทคนิค พฤติกรรมการพิบัติมีหลายรูปแบบดังนั้นจำเป็นต้องพัฒนาเครื่องมือทดสอบเพื่อหาค่าลึงของดินภายใต้ระนาบการพิบัติที่สอดคล้องกัน เช่นงานทางด้านความลาดชัน เนื่องจากการใช้เครื่องมือทดสอบในห้องปฏิบัติการทั่วไป เช่น เครื่องมือทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (Direct Shear Test) ยังมีข้อจำกัดในเรื่องไขของระนาบการวิบัติ ซึ่งอาจไม่สอดคล้องตามสภาพที่เกิดขึ้นจริงในสนาม เนื่องจากการทดสอบถูกกำหนดระนาบการวิบัติ จึงมีการพัฒนาเครื่องมือการทดสอบการเฉือนแบบตรง (Direct Simple Shear Apparatus) ขึ้นมาเพื่อขจัดข้อจำกัดในเรื่องไขของระนาบการวิบัติ ซึ่งปัจจุบันเครื่องมือชนิดนี้ต้องนำเข้าจากต่างประเทศซึ่งมีราคาสูงมาก การทดสอบด้วยเครื่องมือชนิดนี้จึงยังไม่แพร่หลายภายในประเทศ

งานวิจัยนี้ต้องการศึกษาและพัฒนาเครื่องมืออุปกรณ์การทดสอบการเฉือนแบบตรงขึ้นมาโดยใช้วัสดุอุปกรณ์ที่มีอยู่ในประเทศเพื่อลดการนำเข้าเครื่องมือการทดสอบจากต่างประเทศซึ่งเป็นการลดต้นทุนการทดสอบได้อีกทางหนึ่ง โดยที่วิธีการทดสอบและผลการทดสอบเป็นไปตามมาตรฐานของ ASTM D 6525-00 (Standard Test Method for Consolidated Undrained Direct Simple Shear Apparatus of Cohesive Soils)

1.2 วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1.2.1 เพื่อพัฒนาเครื่องมืออุปกรณ์การทดสอบการเฉือนแบบตรงอย่างง่าย (Direct Simple Shear Apparatus) สำหรับการเฉือนทางเดียว (Monotonic)

1.2.2 เพื่อหาพารามิเตอร์ของ SHANSEP (Stress History and Normalized Soil Engineering Properties) สำหรับดินเหนียวปากพนัง

1.3 ขอบเขตของการวิจัย

1.3.1 สร้างเครื่องมือทดสอบทดสอบแรงเฉือนแบบตรงอย่างง่าย (Direct Simple Shear Apparatus) ตามมาตรฐานของ ASTM D 6525-00 (Standard Test Method for Consolidated Undrained Direct Simple Shear Apparatus of Cohesive Soils)

1.3.2 ทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบตรงอย่างง่าย (Direct Simple Shear Test) ด้วยดินเหนียวปากพนัง

1.3.3 ทดสอบแรงเฉือนแบบตรงอย่างง่าย (Direct Simple Shear Apparatus) โดยทดสอบแบบไม่ระบายน้ำ ทำการเฉือนด้วยอัตราความเครียดคงที่ (Constant strain rate) อัตราความเครียดคือ 0.075 เปอร์เซ็นต์ต่อนาทีและใช้ค่าอัตราการอัดแน่นเกินตัว 4 ค่า คือ 1 2 4 และ 8 จำนวนรวมทั้งสิ้น 12 ตัวอย่าง

1.3.4 ประเมินประสิทธิภาพของเครื่องมือทดสอบทดสอบแรงเฉือนแบบตรงอย่างง่าย (Direct Simple Shear Apparatus) โดยการเปรียบเทียบกับผลการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำของ ศิริพร (2556) และผลการทดสอบแรงเฉือนแบบตรงอย่างง่ายจากเครื่องทดสอบจากต่างประเทศ นิรุจน์ (2550)

1.3.5 การเก็บข้อมูลที่ได้จากการทดสอบแรงเฉือนแบบตรงอย่างง่ายแบบไม่ระบายน้ำจะเก็บข้อมูลความเค้นความเครียด และแรงดันน้ำส่วนเกิน ตั้งแต่เริ่มต้นเฉือนจนถึง 20 เปอร์เซ็นต์ของอัตราความเครียดเฉือน โดยใช้เครื่องบันทึกข้อมูลเชิงตัวเลขแบบอัตโนมัติ (Autonomous data – acquisition)

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1.4.1 ได้เครื่องมืออุปกรณ์การทดสอบการเฉือนแบบตรง (Direct Simple Shear Apparatus) สำหรับการเฉือนทางเดียว (Monotonic)

1.4.2 สามารถประมาณค่ากำลังรับแรงเฉือนทางเดียวอย่างง่ายแบบไม่ระบายน้ำแบบทางเดียว ประยุกต์ใช้สมการความสัมพันธ์แบบ SHANSEP เพื่อประมาณค่ากำลังรับแรงเฉือนสำหรับดินทั่วไป

1.4.3 ประยุกต์ใช้สมการความสัมพันธ์แบบ SHANSEP เพื่อประมาณค่ากำลังรับแรงเฉือนสำหรับดินทั่วไป

1.4.4 ข้อมูลที่ได้ไปใช้เป็นประโยชน์สำหรับการออกแบบทางวิศวกรรมหรือเพื่อพัฒนาเป็นงานวิจัยอื่นๆ ต่อไป

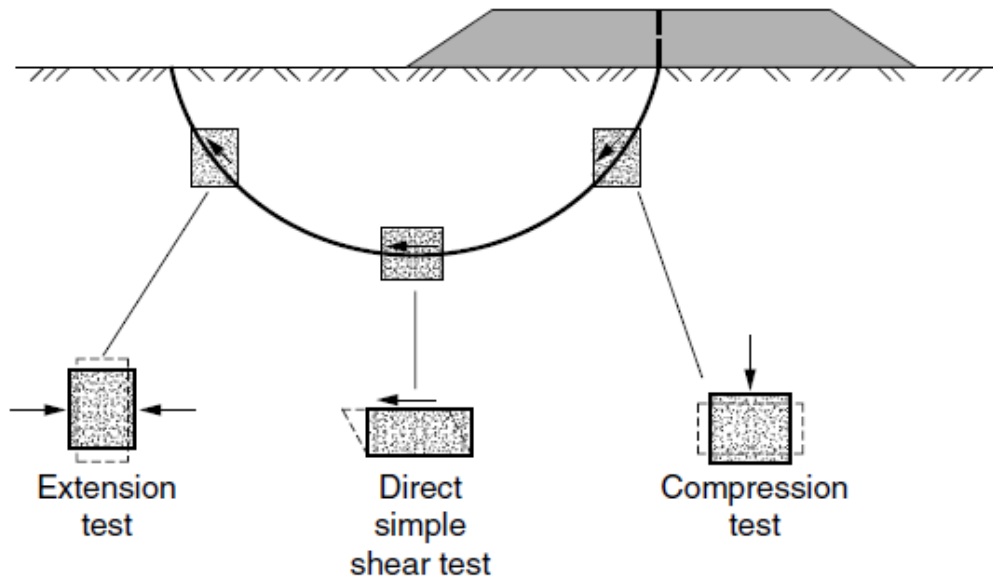
บทที่ 2

แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

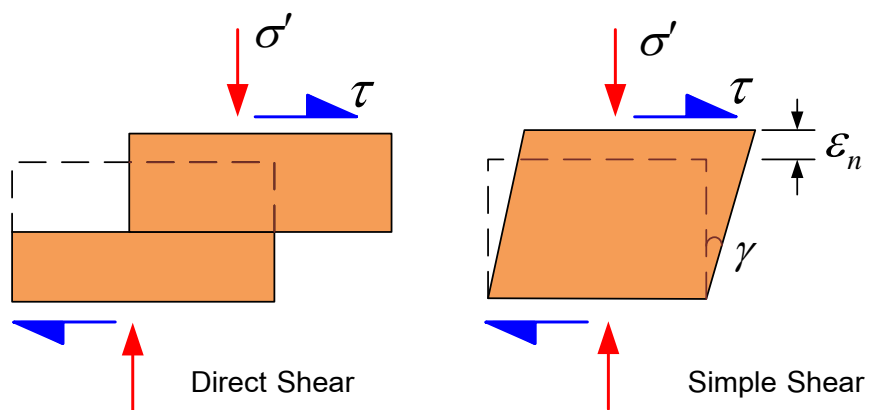
การศึกษาครั้งนี้จะศึกษาเครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาเครื่องทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายขึ้นมา การศึกษาทฤษฎีกำลังรับแรงเฉือนของดิน ศึกษากำลังรับแรงเฉือนของดินโดยการเฉือนทางตรงอย่างง่ายเพื่อสามารถวิเคราะห์ผลการทดสอบตลอดจนประเมินประสิทธิภาพของเครื่องเครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายที่พัฒนาขึ้นมา

2.1 บทนำ

ดินเหนียวมีค่าความชื้นน้ำต่ำ จึงไม่สามารถระบายน้ำออกได้ทันเมื่อถูกน้ำหนักกระทำ กำลังรับแรงเฉือนของดินเหนียวจึงเป็นแบบไม่ระบายน้ำแต่การประมาณค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำให้ถูกต้องเป็นสิ่งยาก ดังนั้นการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของดินในห้องปฏิบัติการมีอยู่หลายวิธี มีข้อดี ข้อด้อยต่าง ๆ กัน ดังตารางที่ 2.1 ซึ่งแต่ละวิธีจะให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่แตกต่างกัน การเลือกใช้วิธีการทดสอบเพื่อการประมาณค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำที่ถูกต้องควรสอดคล้องกับทฤษฎีการบีบอัด ดังรูปที่ 2.1 ปัจจุบันวิธีการทดสอบหาลำกำลังรับแรงเฉือนดินในห้องปฏิบัติการมีอยู่หลายวิธีแต่วิธีที่นิยมกันมาก คือ การทดสอบแรงอัดสามแกน (Triaxial Test) เป็นวิธีที่สามารถหาค่าพารามิเตอร์ของดินได้ทุกอย่าง แต่เป็นวิธีที่ซับซ้อน ยุ่งยาก แต่การทดสอบแรงเฉือนโดยตรง (Direct shear test) เป็นการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินที่ง่ายและรวดเร็วแต่กำหนดระนาบของการวิบัติแนวราบ ดังรูปที่ 2.2 ซึ่งไม่สอดคล้องกับการบีบอัดที่แท้จริงได้ อีกทั้งเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนโดยตรงยังไม่สามารถควบคุมการระบายน้ำได้ ทำให้ไม่สามารถวัดแรงดันน้ำการทดสอบจึงมีการทดสอบเพียงแบบชั่วคราวเท่านั้น ส่วนการทดสอบแบบเร็วไม่มีมาตรฐานรองรับเนื่องจากไม่ทราบค่าแรงดันน้ำ ข้อเสียอีกประการหนึ่งของการทดสอบการเฉือนโดยตรงคือ ไม่สามารถทำให้ตัวอย่างอึดตัวได้เหมือนกับ การทดสอบสามแกน ดังนั้นการแก้ปัญหาระนาบการวิบัติของทดสอบคือ การพัฒนาเครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทางตรงอย่างง่าย



รูปที่ 2.1 ความสัมพันธ์ของการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนในห้องปฏิบัติการกับกำลังรับแรงเฉือนของดินในสนาม (Bjerrum, L. 1972)



รูปที่ 2.2 เปรียบเทียบระนาบการบิดของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนทางตรง (Direct Shear) และทางตรงอย่างง่าย (Simple Shear)

ตารางที่ 2.1 แสดงสาระสำคัญของ การทดสอบกำลังรับแรงเฉือน โดยทั่วไป

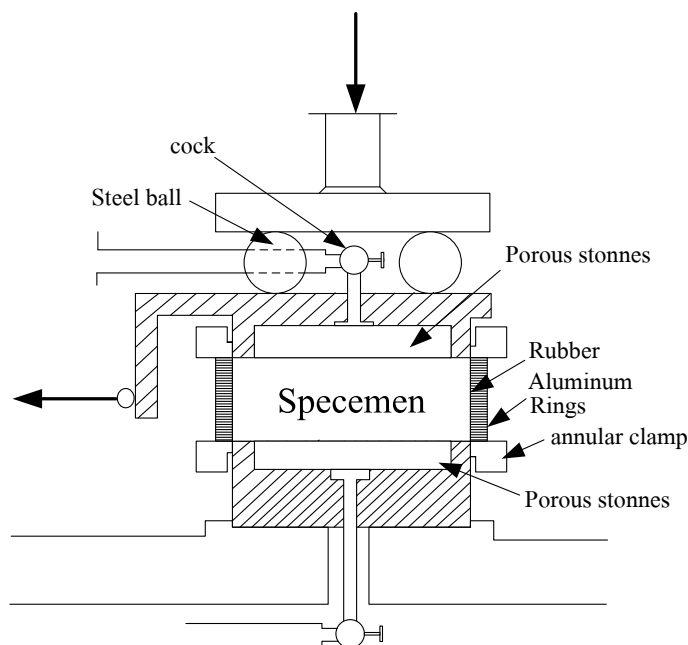
Test Type	Applicability	Advantages	Disadvantages	Additional Information
Direct shear	a. Effective strength parameters for coarse-grained and fine-grained soils	a. Simple and inexpensive b. Thin sample allows for rapid drainage of fine-grained soils	a. Only for drained conditions b. Failure plane forced to occur at joint in box c. Nonuniform distribution of stress and strain d. No stress-strain data	a. ASTM D3080* b. U.S. Army, 1970 c. Saada and Townsend, 1981 d. Head, 1982
Triaxial	a. Effective and total strength parameters for coarse-grained and fine-grained soils b. Compared to direct shear tests, triaxial tests are preferred for fine-grained soils	a. Easy to control drainage b. Useful stress-strain data c. Can consolidate sample hydrostatically or to <i>in situ</i> K_0 state of stress d. Can simulate various loading conditions	a. Apparatus more complicated than other types of tests b. Drained tests on fine-grained soils must be sheared very slowly	a. ASTM D2850* b. U.S. Army, 1970 c. Donaghe et al., 1988 d. Head, 1982 e. Head, 1986
Direct simple shear	a. Most common application is undrained shear strength of fine-grained soils	a. K_0 consolidation b. Gives reasonable values of undrained shear strength for design use	a. Nonuniform distribution of stress and strain	a. Bjerrum and Landva, 1966 b. Saada and Townsend, 1981
Unconfined	a. Undrained shear strength of 100% saturated samples of homogenous, unfissured clay b. Not suitable as the only basis for design on critical projects	a. Very rapid and inexpensive	a. Not applicable to soils with fissures, silt seams, varves, other defects, or less than 100% saturation b. Sample disturbance not systematically accounted for	a. ASTM D2166* b. U.S. Army, 1970 c. Head, 1982
Lab vane	Same as for unconfined test	Same as for unconfined test	Same as for unconfined test	Head, 1982

* Designation for American Society of Testing and Materials test procedure.

2.1.1 ประวัติเครื่องมือการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่าย

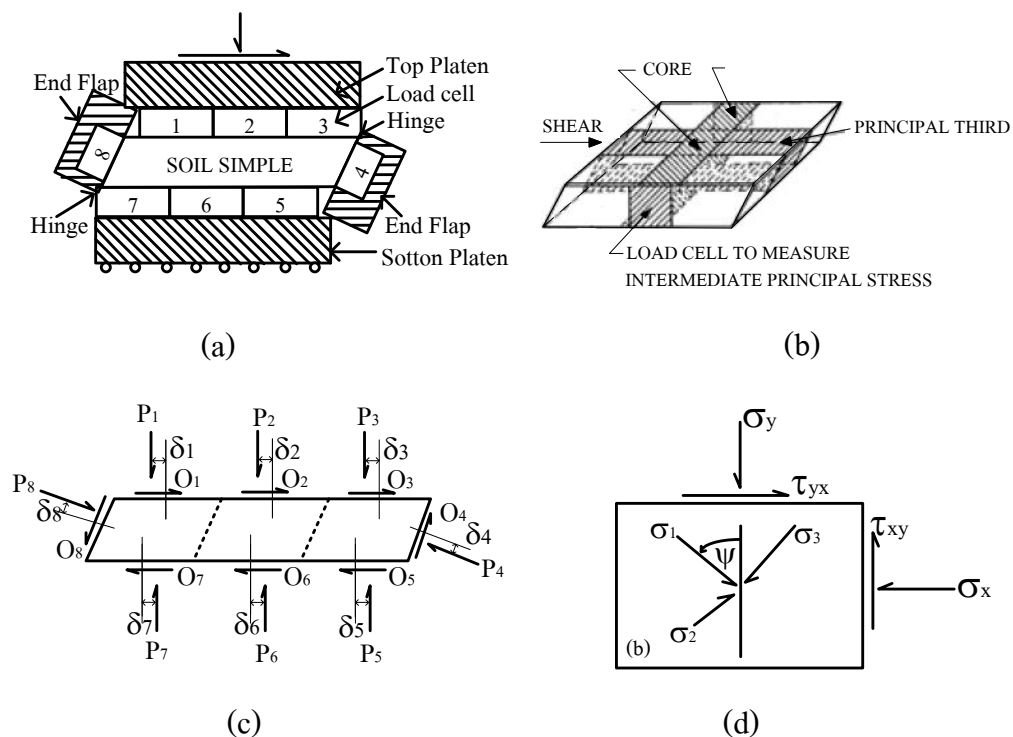
ปี ค.ศ.1936 เริ่มมีการพัฒนาเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนทางตรงขึ้นเพื่อใช้ในการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดิน และในเวลาต่อมา Royal Swedish Geotechnical Institute ได้พัฒนาเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนทางตรงให้เป็นเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่าย โดยลักษณะของตัวอย่างทดสอบของ Royal Swedish Geotechnical Institute จะมีหน้าตัดเป็นวงกลม ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 6 เซนติเมตร สูง 2 เซนติเมตร ซึ่งมีแผ่นรอง (Grooved Plate) ทั้งด้านบนและด้านล่างของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบดังรูปที่ 2.3 และมีแผ่นยางสังเคราะห์ ซึ่งทำจากอลูมิเนียมวางเรียงซ้อนเป็นชั้นแล้วเคลือบด้วยยาง หุ้มตัวอย่างทดสอบเพื่อไม่ให้มีการเปลี่ยนแปลงของหน้าตัด และมีน้ำหนักถ่วงจากตะกั่วใช้เป็นตัวกระทำควมเค้นใน

แนวคิ่งและความเค้นเฉือนในแนวราบ ตัวอย่างจะถูกเฉือน ภายใต้สภาวะการควบคุมความเค้น (Stress control) (Kjellman,1951)



รูปที่ 2.3 หน้าตัดของเครื่องมือการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายของ Royal Swedish Geotechnical Institute (Kjellman, 1951)

ต่อมาในปี ค.ศ.1953 มหาวิทยาลัยเคมบริดจ์ ประเทศอังกฤษ ทำการพัฒนาเครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทางตรงอย่างง่าย (Roscoe, 1953) โดยมีการกำหนดให้มีความเค้นเฉือนอย่างง่ายเกิดขึ้นในตัวอย่างทดสอบ ขนาด $6 \times 6 \times 2$ เซนติเมตร สำหรับการทดสอบตัวอย่างดินทรายที่สามารถวัดค่าการเปลี่ยนแปลงปริมาตรระหว่างกระทำแรงเฉือนได้ โดยปัจจุบันได้พัฒนาเครื่องมือมาจนถึงรุ่น Mk7 ซึ่งเป็นเครื่องมือวัดที่ซับซ้อนมาก สามารถวัดค่าแรงกระทำตั้งฉาก และแรงเฉือนที่ขอบของตัวอย่างดิน และยังสามารถทดสอบตัวอย่างที่เป็นดินเหนียวได้ ดังรูปที่ 2.4



รูปที่ 2.4 อุปกรณ์ทดสอบแรงเฉือนอย่างง่ายของมหาวิทยาลัยเคมบริดจ์แบบ Mk7 (a) รูปตัดของเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายของมหาวิทยาลัยเคมบริดจ์ (b) การจัดเครื่องวัดแรง (c) การติดตั้งที่วัดแรงต่างๆ ไป (d) ความเค้นที่แกนกลางของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบ

(Budhu, 1985)

ในปี ค.ศ. 1960 Norwegian Geotechnical Institute (NGI) ทำการพัฒนาเครื่องมือสำหรับทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทางตรงอย่างง่าย (Bjerrum และ Landva, 1966) โดยใช้หลักการเดียวกันกับแบบ Royal Swedish Geotechnical Institute เครื่องมือนี้ถูกออกแบบมาเพื่อให้สามารถทดสอบการอัดตัวคายน้แบบ K_0 สำหรับตัวอย่างดินเหนียวคงสภาพที่มีความไวสูง ตัวอย่างทดสอบมีลักษณะเป็นทรงกระบอก ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 เซนติเมตร สูง 2 เซนติเมตร โดยมีแผ่นยางเสริมลวดเหล็ก (Wire-reinforced Rubber Membrane) หุ้มตัวอย่างทดสอบ ซึ่งแผ่นยางเสริมลวดเหล็กยอมให้ตัวอย่างเคลื่อนที่เฉพาะในแนวตั้งและในแนวราบเท่านั้น โดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างทดสอบ

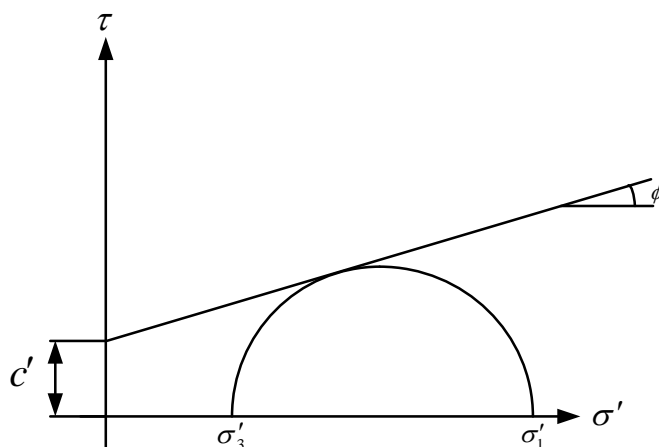
2.2 ทฤษฎีและสมมุติฐาน

2.2.1 สมมุติฐานของการวิบัติของดิน

การทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติด้านกำลังรับแรงเฉือนของดิน มีองค์ประกอบของกำลังรับแรงเฉือนที่สำคัญสองประการคือ แรงเสียดทานภายในระหว่างเม็ดดิน และแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินสำหรับดินที่ไม่มีแรงยึดเหนี่ยว เช่น กรวด ทราย ค่ากำลังรับแรงเฉือนขึ้นอยู่กับแรงเสียดทานภายในระหว่างเม็ดดินและน้ำหนักกดที่กระทำตั้งฉากกับระนาบของแรงเฉือน แต่ดินชนิดที่มีแรงยึดเหนี่ยว เช่น ดินเหนียว กำลังรับแรงเฉือนขึ้นอยู่กับแรงยึดเหนี่ยวระหว่างเม็ดดินในปี ค.ศ. 1773 คูลอมป์ พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนกับความเค้นตั้งฉากที่ผิวสัมผัสกับระนาบต่างๆ ของดินอยู่ในรูปของสมการเส้นตรงดังรูปที่ 2.5 เรียกว่า สมการมอร์-คูลอมป์ ซึ่งใช้หาค่ากำลังรับแรงเฉือนที่จุดวิบัติของดิน

$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi' \quad (2.1)$$

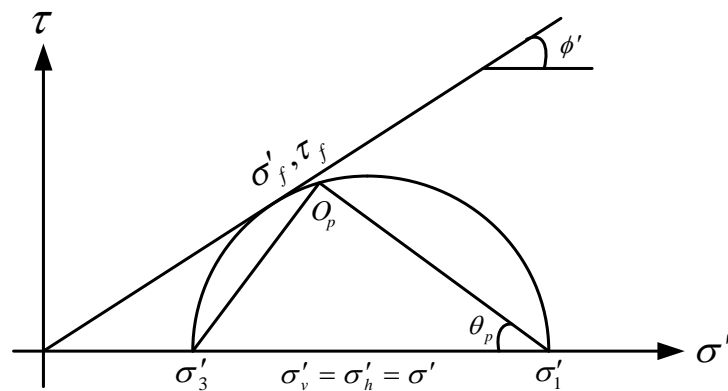
เมื่อ τ คือ ความเค้นเฉือนบนระนาบที่เกิดการวิบัติ σ' คือความเค้นตั้งฉากบนระนาบที่เกิดการวิบัติ σ'_1 คือความเค้นที่กระทำหลัก (Major Principal Stress) σ'_3 คือ ความเค้นที่กระทำรอง (Minor Principal Stress) c' คือความเชื่อมแน่น ϕ' คือมุมด้านทานแรงเฉือน



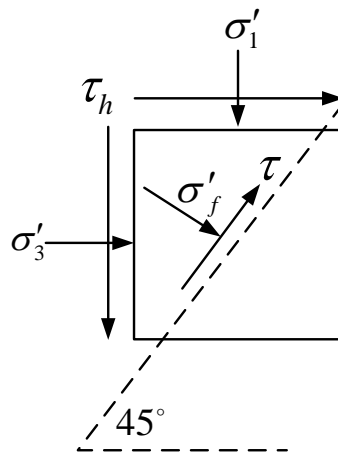
รูปที่ 2.5 การพิบัติของดินตามสมมุติฐานของมอร์-คูลอมป์

2.2.2 สมมุติฐานของการวิบัติของดินที่ใช้กับเครื่องมือทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทางตรงอย่างง่าย

จากสมมุติฐานการวิบัติของดินของ มอร์-คูลอมป์ โดยเริ่มต้นของความเค้นที่กระทำต่อตัวอย่างเป็นค่าที่ได้จากการอัดตัวคายน้ำแบบ K_0 และความเค้นที่กระทำบนระนาบที่เป็นระนาบวิบัติคือ τ_f และ σ'_f ดังรูปที่ 2.6



(a)

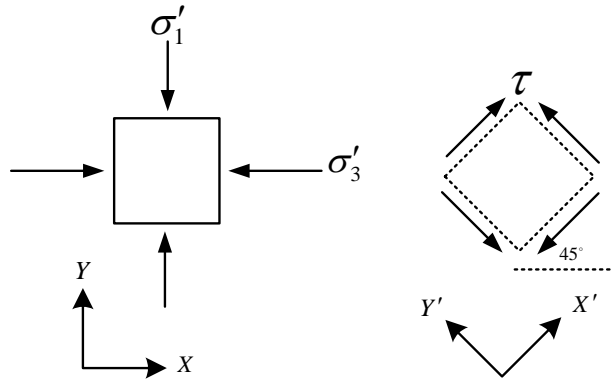


(b)

รูปที่ 2.6 การวิบัติของดินตามสมมุติฐานของมอร์-คูลอมป์

(a) ความเค้นสูงสุดในวงกลมมอร์-คูลอมป์ (b) ระนาบการวิบัติของตัวอย่างทดสอบ

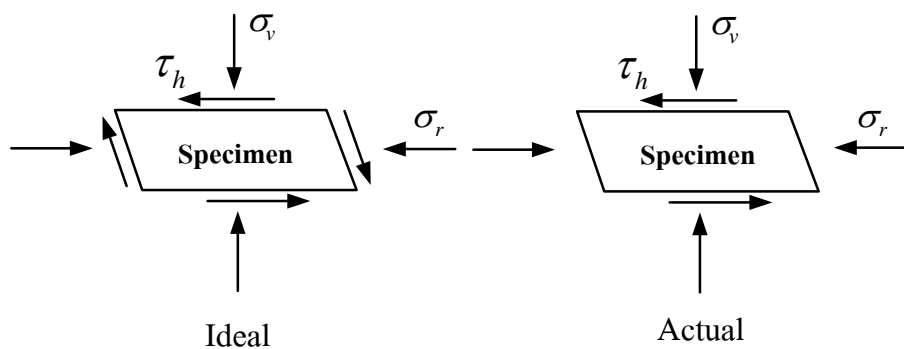
เมื่อ τ_f = ความเค้นเฉือนสูงสุดในระนาบวิบัติ τ_h = ความเค้นเฉือนสูงสุดในแนวราบ θ_p = มุมระหว่างระนาบของความเค้นที่กระทำหลักกับแนวราบ ϕ' คือมุมด้านทานแรงเฉือนโดยระนาบความเค้นหลักจะเอียงทำมุม 45° กับแนวราบ ($\theta_p = 45^\circ$) ซึ่งจะปรากฏความเค้นเฉือนสูงสุดดังรูปที่ 2.7 โดยความเค้นกดตั้งฉากที่กระทำเริ่มต้นต้องอยู่ในสถานะเท่ากันทุกทิศทาง (Isotropic)



รูปที่ 2.7 การหมุนวงกลมมอร์-คูลอมป์เพื่อให้เห็นความเค้นเฉือนสูงสุด

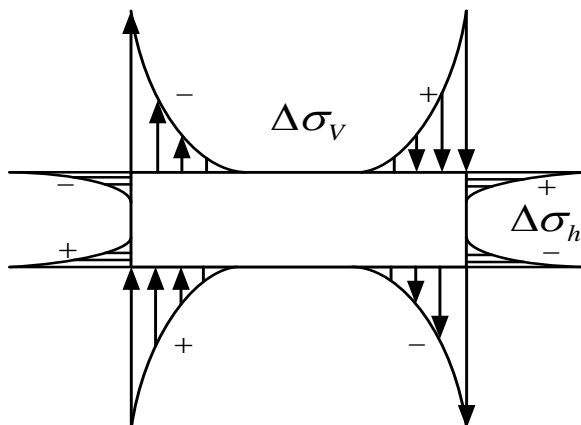
2.2.3 สมมุติฐานเกี่ยวกับความสม่ำเสมอของความเค้นและความเครียด

ปัญหาความสม่ำเสมอของความเค้นและความเครียด เกิดจากอุปกรณ์การทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายไม่สามารถกระทำความเค้นเฉือนตลอดทั้งตัวอย่างทดสอบอย่างสมบูรณ์ได้ทั้งในระนาบที่ตั้งฉากกับแนวราบและความเค้นเฉือนที่ผิวของตัวอย่างทดสอบดังรูปที่ 2.8 (Roscoe, 1953)



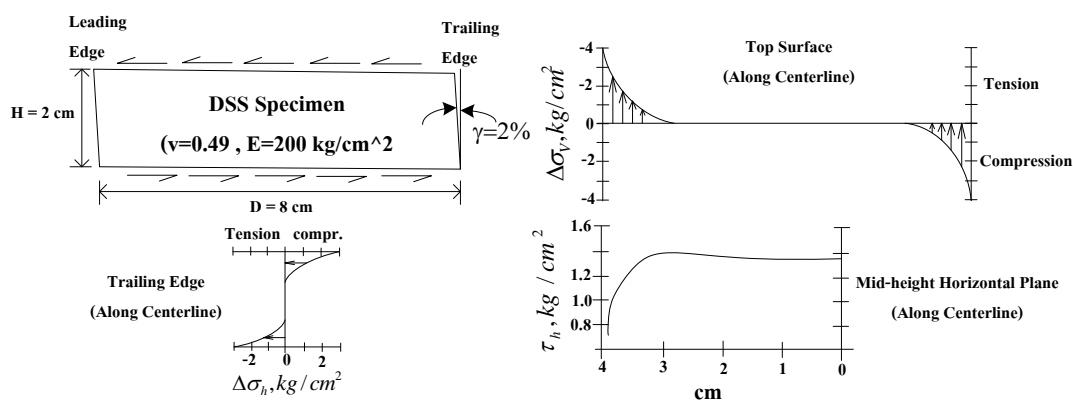
รูปที่ 2.8 การเปรียบเทียบระหว่างสถานะของความเค้นในตัวอย่างทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายกับสภาพที่เกิดขึ้นจริง (Roscoe, 1953)

ในปี ค.ศ. 1953 Roscoe, Duncan และ Dunlop ได้ทดสอบเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายกับวัสดุแบบยืดหยุ่น (Elastic Material) ของมหาวิทยาลัยเคมบริดจ์และวิเคราะห์ทางคณิตศาสตร์ พบว่าความเค้นเฉือนที่กระทำตามผิวด้านบนและด้านล่างมีค่าเท่ากันแต่จะกระทำในลักษณะที่เป็นแรงคู่ควบซึ่งกันและกัน ส่วนด้านข้างของตัวอย่างทดสอบจะเกิดแรงคู่ควบที่มีขนาดเท่ากันกระทำอยู่ด้วยดังรูปที่ 2.9



รูปที่ 2.9 ความเค้นยืดหยุ่นในอุปกรณ์การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายของมหาวิทยาลัยเคมบริดจ์ (Roscoe, 1953; Duncan และ Dunlop, 1969)

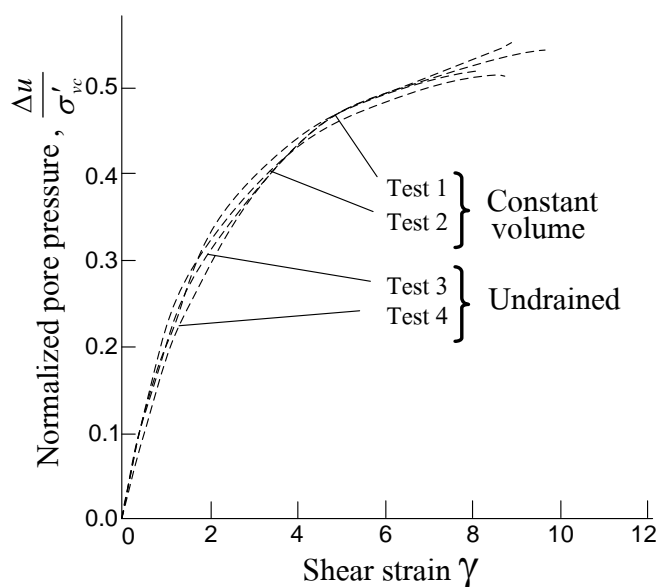
ในปี ค.ศ. 1972 Lucks ศึกษาสภาพของความเค้นของเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายของบริษัท Geonor กับวัสดุที่มีคุณสมบัติยืดหยุ่นแบบเชิงเส้นเท่ากันทุกทิศทาง (Linear Elastic Isotropic) และวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ 3 มิติจากผลการทดสอบดังรูปที่ 2.10 ซึ่งปรากฏความเค้นที่เกิดขึ้นมีค่ามากที่สุดที่บริเวณขอบของวัสดุ แต่ยังมีค่าน้อยมากซึ่งยังไม่สามารถหักล้างสมมุติฐานว่า ความเค้นที่กระทำมีความสม่ำเสมอตลอดทั้งตัวอย่างทดสอบได้



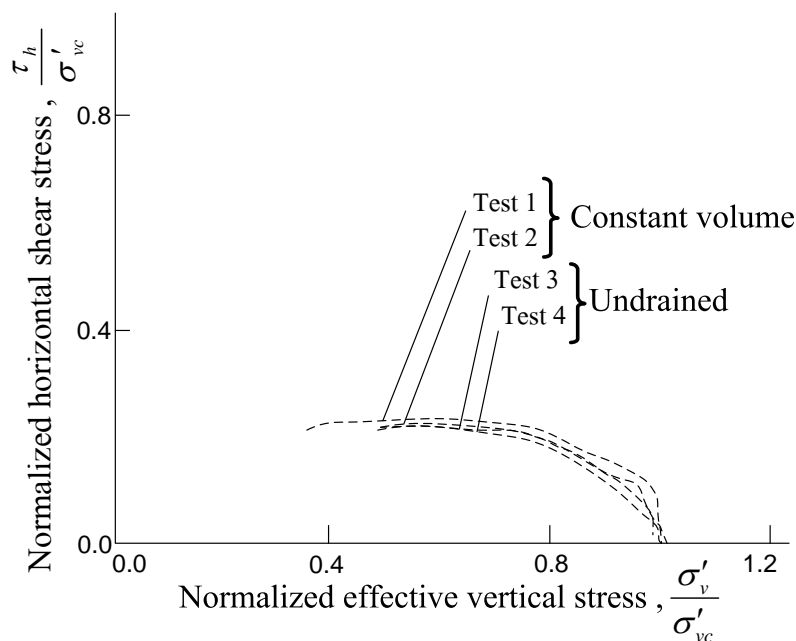
รูปที่ 2.10 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายของบริษัท Geonor (Lucks ,1972)

2.2.4 สมมุติฐานเกี่ยวกับการทดสอบแบบปริมาตรคงที่

การทดสอบแบบไม่ระบายน้ำของเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายคือการควบคุมปริมาตรของตัวอย่างทดสอบให้มีค่าคงที่ตลอดการกระทำ ความเค้นเฉือน การทดสอบด้วยเครื่องมือการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของ Geonor จะมีแรงดันด้านข้างจากวงยางรอบตัวอย่างทดสอบ และยังรักษาพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่างทดสอบให้มีค่าคงที่ การเปลี่ยนแปลงของความเค้นในแนวตั้งมีค่าเท่ากับค่าแรงดันน้ำส่วนเกิน (Excess Pore Water Pressure) ที่เกิดขึ้น ในปี ค.ศ. 1987 Dyvik ทำการวัดแรงดันน้ำส่วนเกินในเครื่องมือการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายของ NGI เพื่อวัดแรงดันน้ำส่วนเกินในขณะที่ทดสอบตัวอย่างดินแบบไม่ระบายน้ำ และทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบปริมาตรคงที่ ในเงื่อนไขของ CK_0 UDSS กับตัวอย่างทดสอบเป็นดินเหนียวที่มีอัตราส่วนการอัดตัวแน่นปกติ และเปรียบเทียบกับผลการทดสอบทั้ง 2 แบบ ดังรูปที่ 2.11 จากผลการทดสอบทั้งสองวิธี สรุปว่า การการเปลี่ยนแปลงของความเค้นในแนวตั้งจะมีค่าเท่ากับการแรงดันน้ำส่วนเกิน ที่เกิดขึ้นในตัวอย่างการทดสอบนั้นเป็นจริงแต่ตัวอย่างที่นำมาทดสอบนั้นจะต้องเป็นตัวอย่างที่อิ่มตัวด้วยน้ำ



(a)



(b)

รูปที่ 2.11 การเปรียบเทียบผลการทดสอบแบบปริมาตรคงที่และการทดสอบแบบไม่ระบายน้ำ
ที่มีการวัดแรงดันน้ำส่วนเกิน

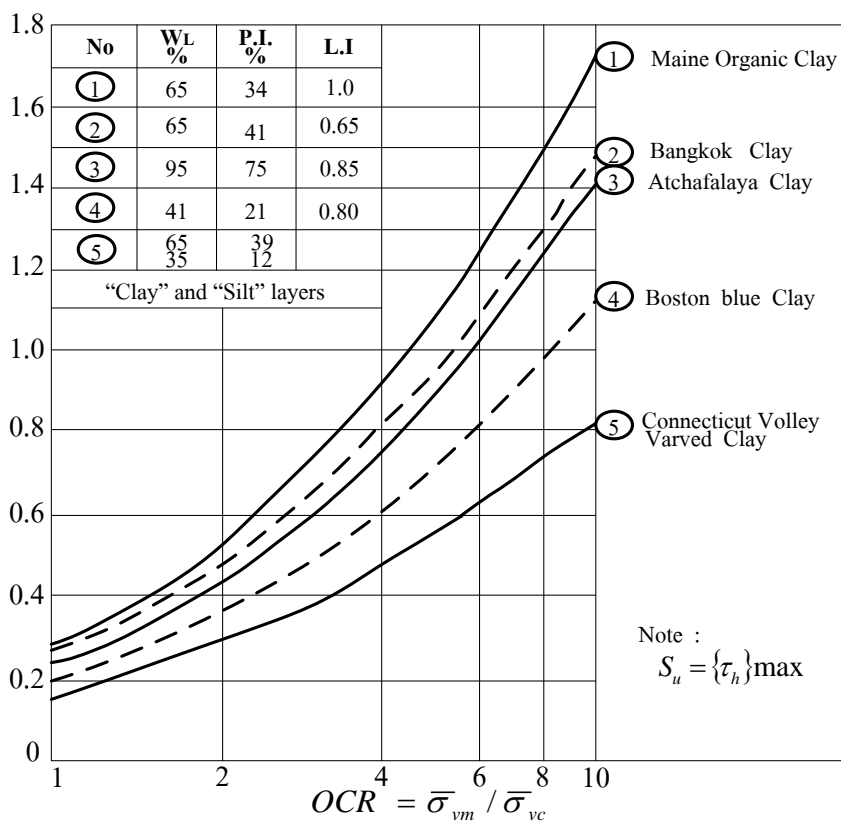
(a) รูปแสดงการเปรียบเทียบระหว่าง Normalized Excess Pore Water Pressure กับ Shear Strain

(b) รูปแสดง Normalized Effective Stress Path (Dyvik, 1987)

2.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนอย่างง่ายแบบทางเดียว

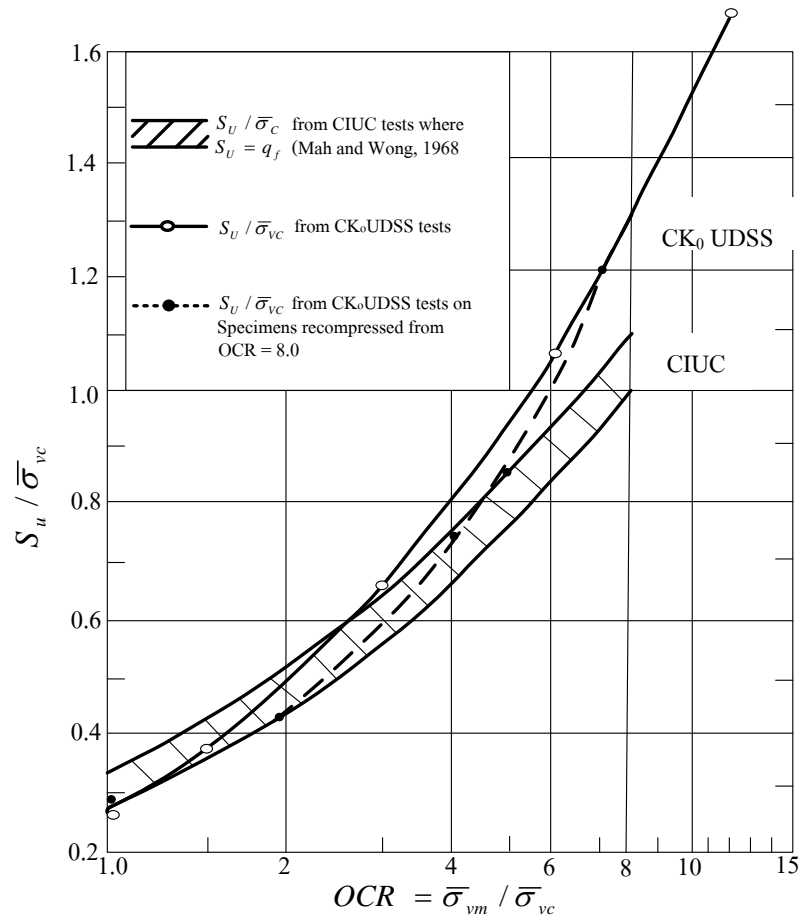
ผลข้อมูลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายในอดีต ทำการเก็บตัวทดสอบจากบริเวณต่างๆดังนี้ Atchafalaya, Boston, Connecticut, Portland และดินเหนียวกรุงเทพฯ (Bangkok Clay) ซึ่งทำการทดสอบด้วยเครื่องทดสอบทางตรงอย่างง่ายที่ Massachusetts Institute of technology (MIT) ในการทดสอบจะวัดค่าแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำสูงสุดของตัวอย่างดิน ที่อัตราส่วนการอัดตัวแน่นเกินตัว (Overconsolidated Clay) ที่แตกต่างกัน เรียกการทดสอบนี้ว่าการทดสอบ CK_0UDSS (K_0 Consolidation-Undrained Direct Simple Shear Test) (Ladd and Edger, 1972)

นำผลการทดสอบมาสร้างความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากำลังรับแรงเฉือนต่อความเค้นประสิทธิผลในแนวตั้งกับค่าอัตราส่วนการอัดตัวแน่นเกินตัวของดินเหนียวทั้ง 5 ชนิด และสามารถบอกถึงการเปลี่ยนแปลงของกำลังรับแรงเฉือนที่มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อค่าอัตราส่วนการอัดตัวแน่นเกินตัวเพิ่มขึ้นดังรูปที่ 2.12



รูปที่ 2.12 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากำลังรับแรงเฉือนต่อความเค้นประสิทธิผลในแนวดิ่ง เปรียบเทียบกับค่า ค่าอัตราส่วนการอัดตัวแน่นเกินตัว ของการทดสอบ CK_0UDSS ในดินเหนียวอัดตัวแน่นมากกว่าปกติ จำนวน 5 ชนิด (Ladd และ Edger , 1972)

การทดสอบ CK_0UDSS ในดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ (Ladd และ Edger, 1972) โดยเก็บตัวอย่างจากกระบอกบางขนาด 5 นิ้ว ที่ระดับความลึก 5 เมตร บริเวณสวนลุมพินี แล้วนำไปทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบตรงอย่างง่ายแบบ CK_0UDSS และทดสอบแรงอัดสามแกนแบบ CIUC (Isotropic Consolidation / Undrained Triaxial Compression Test) เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของผลการทดสอบว่ามีความสอดคล้องกันหรือไม่ ดังรูปที่ 2.13



รูปที่ 2.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่าง ค่ากำลังรับแรงเฉือนต่อความเค้นประสิทธิผลใน
แนวตั้งเปรียบเทียบกับค่า ค่าอัตราส่วนการอัดตัวแน่นเกินตัว ของการทดสอบ
CK₀ UDSS ในและการทดสอบ CIUC ของดินเหนียวกรุงเทพฯ

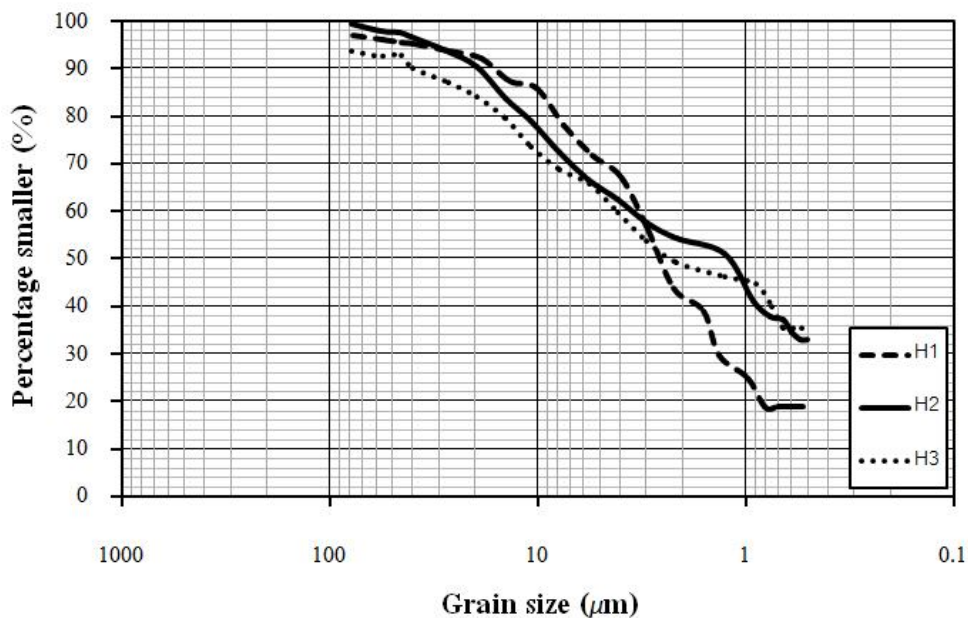
(Ladd และ Edger ,1972)

ในปัจจุบันการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายสามารถทดสอบในประเทศไทยได้แล้ว โดยตัวอย่างที่เคยทดสอบในประเทศไทย เก็บจากบริเวณ โครงการก่อสร้าง สนามบินสุวรรณภูมิ และทำการทดสอบเพื่อศึกษาถึงความเหมาะสมสำหรับการใช้เครื่องมือทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายกับดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ ซึ่งทำการทดสอบแบบทางเดียวและแบบเสมือนวัฏจักร (Pseudo Cyclic Behaviors) (ธวัชชัย 2548)

2.4 ดินเหนียวอ่อนปากพนัง(ศิริพร, 2556)

2.4.1 คุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวอ่อนปากพนัง

ศิริพร (2556) ดินเหนียวปากพนังเกิดจากการตกตะกอนและทับถมบริเวณชายฝั่งทะเล (Marine deposits) โดยมีต้นกำเนิดมาจากเทือกเขาหลวง ลักษณะดินมีสีเทาเนื้อค่อนข้างละเอียดอนุภาคเม็ดดินมีลักษณะแบนและเล็ก ผลจากการศึกษาพบว่าชั้นดินเหนียวอ่อนปากพนังบริเวณชั้นบนตั้งแต่ระดับผิวดินลงไปถึงระดับความลึกประมาณ 3 เมตรมีลักษณะแข็งซึ่งเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของระดับน้ำในมวลดินจากระดับความลึก 3 เมตรลงไปจะมีลักษณะเป็นดินเหนียวอ่อนมีความลึกโดยประมาณ 20 เมตรจากผลการทดสอบตัวอย่างดินด้านคุณสมบัติชั้นพื้นฐานของดินเหนียวในธรรมชาติพบว่าตัวอย่างดินมีค่าความชื้นในมวลดิน (Water content, w_n) ประมาณร้อยละ 80.67 ± 3.36 อครเดซ (2552) ทำการทดสอบพิกัดอัตราเบอร์รี่ได้ค่าขีดพิกัดเหลว (Liquid Limit, LL) ประมาณร้อยละ 64.90 ± 1.64 ค่าขีดพิกัดพลาสติก (Plastic limit, PL) ประมาณร้อยละ 29.90 ± 2.40 จากนั้นซึ่งเมื่อนำไปหาค่าดัชนีพลาสติก (Plastic index, PI) ได้ค่าประมาณร้อยละ 34.90 ± 2.57 และค่าดัชนีเหลว (Liquidity index, LI) เท่ากับ 1.45 ซึ่งจากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าดินเหนียวปากพนังมีค่าความชื้นในธรรมชาติสูงกว่าค่าพิกัดเหลว และมีค่าดัชนีเหลวสูงกว่า 1 ทำให้ทราบว่าคุณสมบัติดังกล่าวบอกระดับความไวตัวของดินเหนียวว่ามีค่าความไวตัวสูง ลักษณะเช่นนี้เมื่อตัวอย่างดินถูกกระทบกระเทือนจะทำให้ดินเหนียวรับกำลังได้น้อยมีการทรุดตัวสูงสำหรับความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (Specific gravity of soil solid, G_s) มีค่าประมาณ 2.71 ± 0.022 หน่วยน้ำหนักรวม (Total unit weight, γ_t) มีค่าประมาณ 1.52 ± 0.019 ตันต่อลูกบาศก์เมตรนอกจากนี้ทำการทดสอบหาการกระจายตัวของอนุภาคสำหรับดินเม็ดละเอียด (Particle size distribution test for fine grained soil) โดยวิธีการทดสอบไฮโดรมิเตอร์ (Hydrometer test) จำนวน 3 ตัวอย่าง ซึ่งในการทดสอบจะตั้งชื่อตัวอย่างในการทดสอบดังต่อไปนี้ ตัวอย่างที่ 1 เรียก H1 เป็นต้น ผลการทดสอบสามารถจำแนกโดยการหาค่าเฉลี่ยออกเป็นดินตะกอน (Silt) ประมาณ 48.70 เปอร์เซ็นต์ ดินเหนียว (Clay) ประมาณ 46.77 เปอร์เซ็นต์และทราย (Sand) ประมาณ 1.31 เปอร์เซ็นต์ซึ่งผลการทดสอบได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.14 และตารางที่ 2.2 ตามลำดับ



รูปที่ 2.14 การทดสอบหาการกระจายตัวของอนุภาคของเม็ดดินที่การทดสอบ 3 ตัวอย่าง

ตารางที่ 2.2 คุณสมบัติทางกายภาพของดินเหนียวปากพั้ง

คุณสมบัติ	ค่า	ค่าเบี่ยงเบน	หน่วย
ค่าความชื้นในธรรมชาติ (w_n)	80.67	3.36	%
ค่าพิกัดเหลว (LL)	64.90	1.64	%
ค่าพิกัดพลาสติก (PL)	29.90	2.40	%
ค่าดัชนีพลาสติก (PI)	34.90	2.57	%
ค่าดัชนีเหลว (LI)	1.45	-	-
ค่าแอกติวิตี (A)	0.75	-	-
ค่าหน่วยน้ำหนัก (γ_t)	1.52	0.019	ton/m ³
ค่าความถ่วงจำเพาะ (G_s)	2.71	0.022	-
ทราย (Sand) ขนาด 0.06 – 2 mm.	1.31	-	%
ดินตะกอน (Silt) ขนาด 0.002 – 0.06 mm.	48.70	-	%
ดินเหนียว (Clay) ขนาด <0.002 mm.	46.77	-	%
อัตราส่วนช่องว่างเริ่มต้น (Initial void ratio, e_0)	2.23	0.08	-

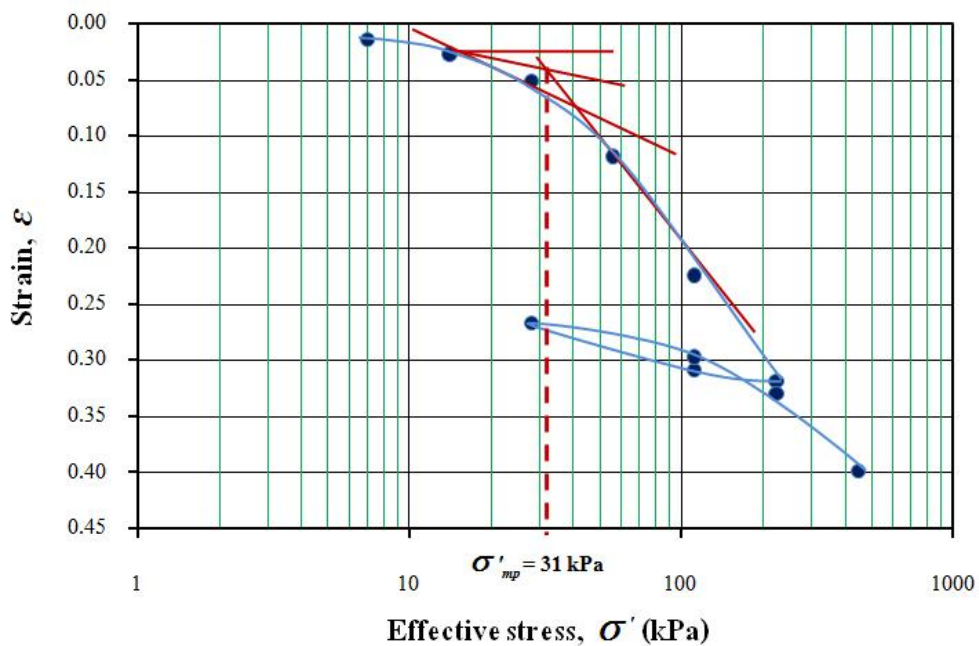
2.4.2 คุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวอ่อนปากพนัง

2.4.2.1 ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบหนึ่งมิติ

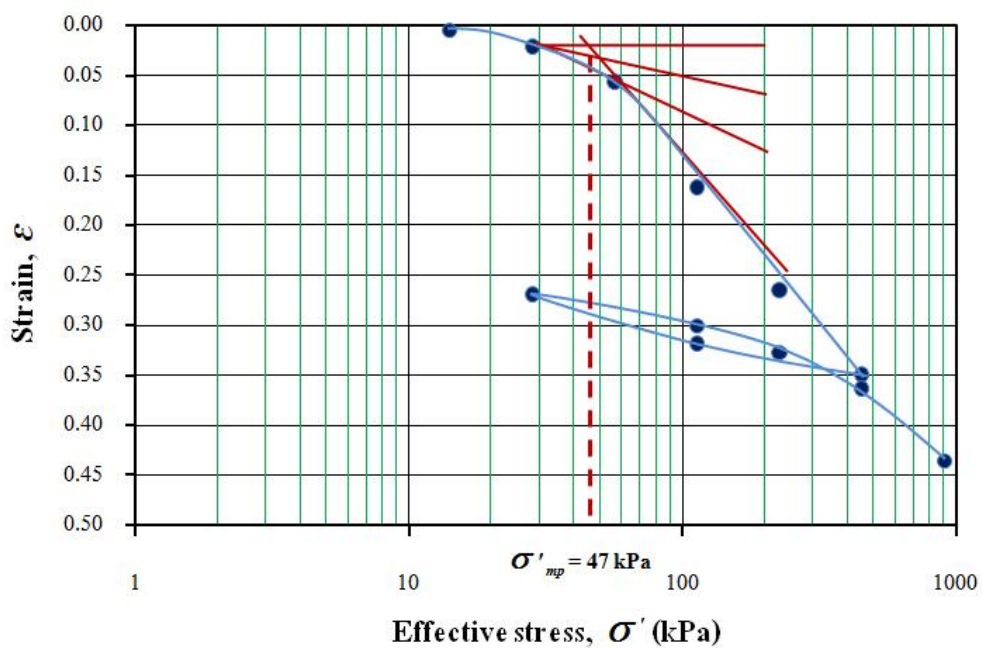
ศิริพร (2556) เมื่อทำการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบหนึ่งมิติซึ่งได้ทำการทดสอบตัวอย่างดินเหนียวปากพนังจำนวน 2 ตัวอย่าง ที่ระดับความลึกแตกต่างกันคือ 4 – 4.5 เมตร และ 7 – 7.5 เมตร โดยระดับความลึกนี้ได้นำไปใช้ในการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำ ด้วย ซึ่งจากผลการทดสอบทั้งหมดประกอบไปด้วยเส้นโค้งการอัดตัว (Compression curve) ซึ่งได้จากการเพิ่มแรงในครั้งแรก เส้นโค้งการบวมตัว (Swelling curve) ซึ่งเป็นการลดแรง (Unload) และเส้นโค้งการอัดตัวซ้ำ (Recompression curve) ซึ่งเป็นการเพิ่มแรงซ้ำ (Reloading) โดยลักษณะของกราฟแสดงในรูปที่ 2.15(a) และ (b) จะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนความเครียด (Strain) ของมวลดินจากการเพิ่มแรงในครั้งแรกจะมีค่ามากกว่าการเปลี่ยนแปลงความเครียดบนเส้นโค้งการบวมตัวและเส้นโค้งการอัดตัวซ้ำ โดยผลจากการทดสอบทั้ง 2 ตัวอย่างแสดงให้เห็นว่าเส้นโค้งการอัดตัวมีความคล้ายคลึงกันและมีความโค้งไม่มากนัก หลังจากนั้นเมื่อลากเส้นตัดกราฟเพื่อนำไปพิจารณาหาค่าความเค้นประสิทธิผลสูงสุดในอดีต (Preconsolidation pressure, σ'_{mp}) เทียบกับค่าความเค้นประสิทธิผลแนวตั้ง ณ ปัจจุบัน (Effective overburden pressure, σ'_{vo}) พบว่าได้ค่าอัตราการอัดแน่นเกินตัว (Over consolidation ratio, OCR) โดยที่ระดับน้ำใต้ดินอยู่ที่ความลึก 1.20 เมตร จากผิวดิน ดังนั้นที่ระดับความลึก 4 – 4.5 เมตร มีค่า OCR เท่ากับ 0.940 และที่ระดับความลึก 7 – 7.5 เมตรมีค่า OCR เท่ากับ 0.931 ตามลำดับ ทำให้สามารถสรุปได้ว่าดินเหนียวปากพนังเป็นดินเหนียวอัดตัวแน่นปกติ (Normally consolidated clay, NC) และเมื่อพิจารณาค่า OCR พบว่ามีค่าลดลงเล็กน้อยเมื่อระดับความลึกของชั้นดินเพิ่มมากขึ้น ผลจากการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบหนึ่งมิติได้แสดงไว้ในตารางที่ 2.3

ตารางที่ 2.3 ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบหนึ่งมิติ

ความลึก (m)	อัตราส่วน ช่องว่าง เริ่มต้น	หน่วย น้ำหนัก เริ่มต้น (ton/m ³)	หน่วย น้ำหนัก สุดท้าย (ton/m ³)	อัตราส่วน ช่องว่าง สุดท้าย	ค่าการทรุดตัว สูงสุด (mm)	ค่าแรงดัน สูงสุดในอดีต (kPa)	อัตราการอัดแน่นเกินตัว (OCR)
4 – 4.5	2.408	1.510	1.886	1.100	7.647	31.00	0.940
7 – 7.5	3.395	1.556	2.054	1.504	8.476	47.00	0.931



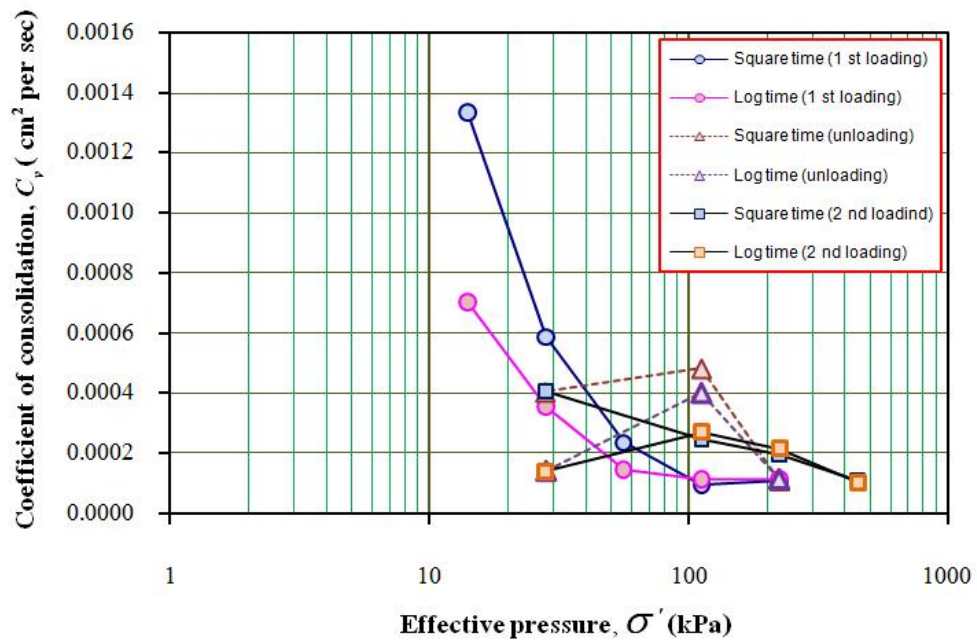
(a)



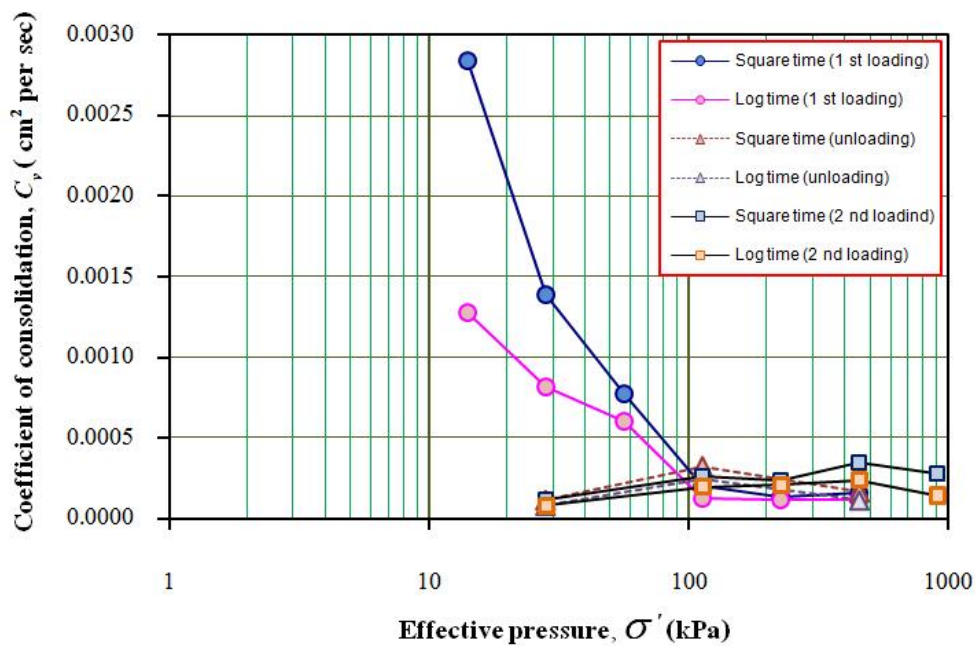
(b)

รูปที่ 2.15 เส้นโค้งการอัดตัวของตัวอย่างดินเหนียวปากพนังจำนวน 2 ตัวอย่าง

(a) ความลึก 4 – 4.5 เมตรและ (b) ความลึก 7 – 7.5 เมตร



(a)

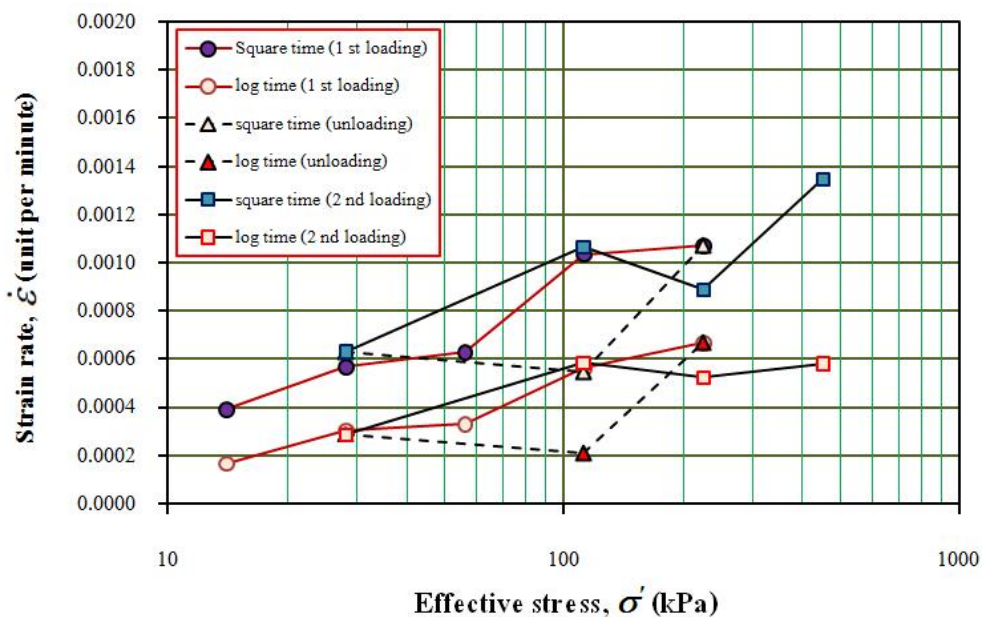


(b)

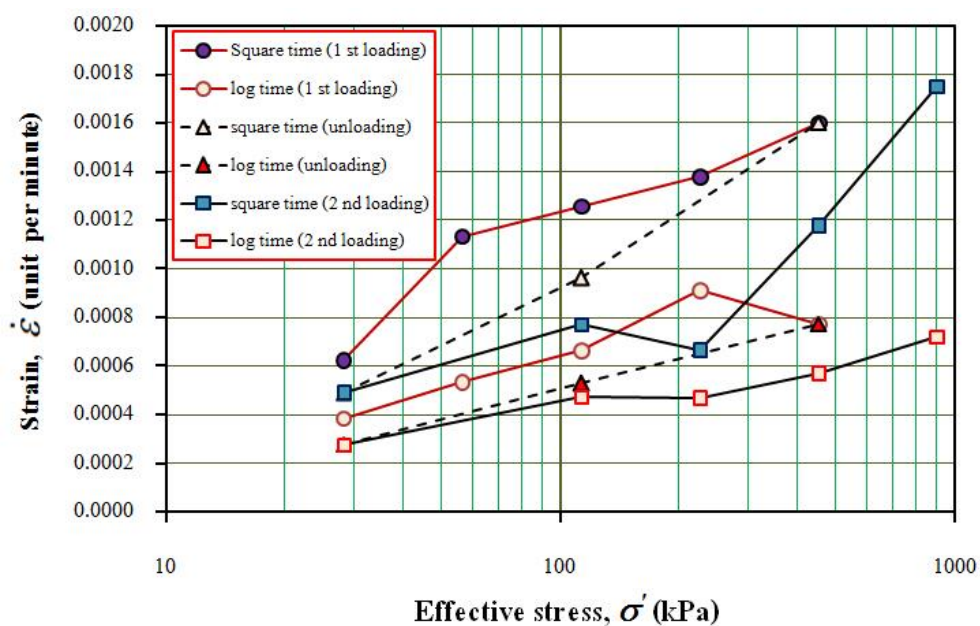
รูปที่ 2.16 ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำที่ได้จากการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบหนึ่งมิติ จำนวน 2 ตัวอย่าง (a) ความลึก 4 – 4.5 เมตร และ (b) ความลึก 7 – 7.5 เมตร

ผลจากการหาค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำ (Coefficient of consolidation, c_v) ของตัวอย่างดินเหนียวปากพั้งพบว่า ในช่วงเริ่มต้นค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำมีค่าสูง เนื่องจากในช่วงเริ่มต้นเป็นช่วงที่ตัวอย่างดินยังมีความเป็น OC อยู่สูง หลังจากที่เพิ่มหน่วยแรงสูงขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์การอัดตัวคายน้ำค่าค่อยๆ ลดลงและคงที่ เนื่องจากตัวอย่างดินมีความเป็น NC มากขึ้น ทั้งนี้ผลการทดสอบทั้งสองระดับความลึก มีลักษณะของกราฟที่คล้ายคลึงกัน ดังแสดงในรูปที่ 2.16 (a) และ (b)

ผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบหนึ่งมิติของดินเหนียวปากพั้งนำไปหาค่าความสัมพันธ์ของอัตราความเครียดตามแนวแกนเฉลี่ย ซึ่งได้จากการเฉลี่ยค่าอัตราความเครียดตามแนวแกนที่เกิดขึ้นด้วยเวลาตั้งแต่เริ่มต้นจนกระทั่งสิ้นสุดการทรุดตัวหลัก (Primary consolidation) ในแต่ละช่วงของการกดทับด้วยน้ำหนักกด ใช้เวลาในการทดสอบในการทดสอบ 24 ชั่วโมง โดยใช้วิธีการหาค่าอัตราความเครียด 2 วิธี คือวิธีรากของเวลา (Root time method) และวิธีล็อกของเวลา (Log time method) แต่วิธีล็อกของเวลาจะให้ค่าที่น้อยกว่าเล็กน้อย นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราความเครียดตามแนวแกนเฉลี่ยยังขึ้นอยู่กับขนาดของหน่วยแรงกดทับอีกด้วยผลการทดสอบแสดงไว้ในรูปที่ 2.17 โดยอัตราความเครียดตามแนวแกนเฉลี่ยที่ได้ในแต่ละความลึกของดินจะมีค่าอัตราการเนือที่ต่ำสุดและสูงสุดแตกต่างกันดังต่อไปนี้ ที่ระดับความลึก 4 – 4.5 เมตร มีอัตราความเครียดต่ำสุด 0.000169 ต่ออนาที อัตราความเครียดสูงสุด 0.00135 ต่ออนาทีและที่ระดับความลึก 7 – 7.5 เมตรมีอัตราความเครียดต่ำสุด 0.000147 ต่ออนาทีอัตราความเครียดสูงสุด 0.00175 ต่ออนาที โดยเมื่อนำค่าดังกล่าวมารวมกันจะสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลอ้างอิงในการเลือกอัตราความเครียดในการทดสอบแรงอัดสามแกนต่อไป



(a)



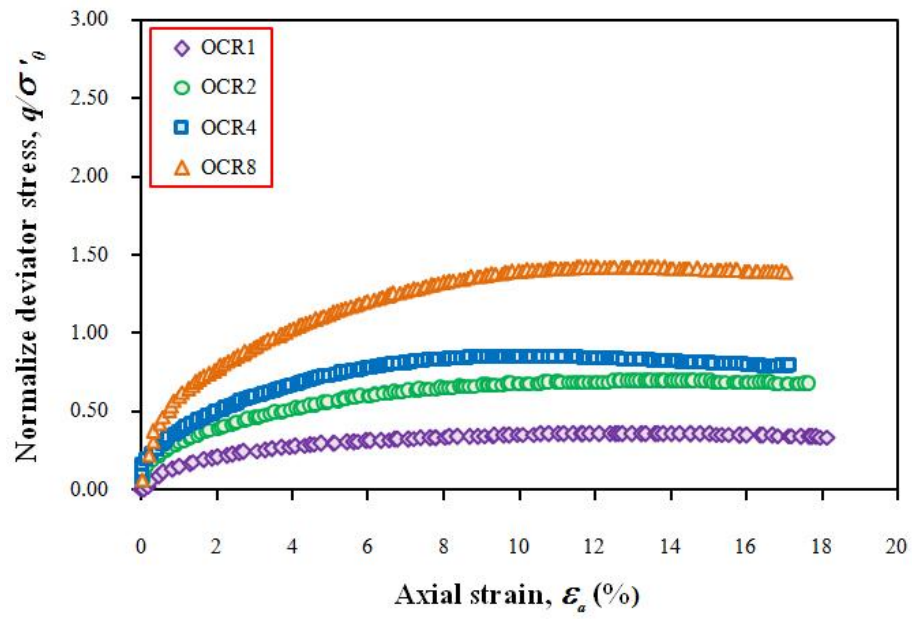
(b)

รูปที่ 2.17 อัตราความเครียดตามแนวแกนเฉลี่ยที่ได้จากการทดสอบ
การอัดตัวคายน้ำแบบหนึ่งมิติจำนวน 2 ตัวอย่าง
(a) ความลึก 4 – 4.5 เมตร และ (b) ความลึก 7 – 7.5 เมตร

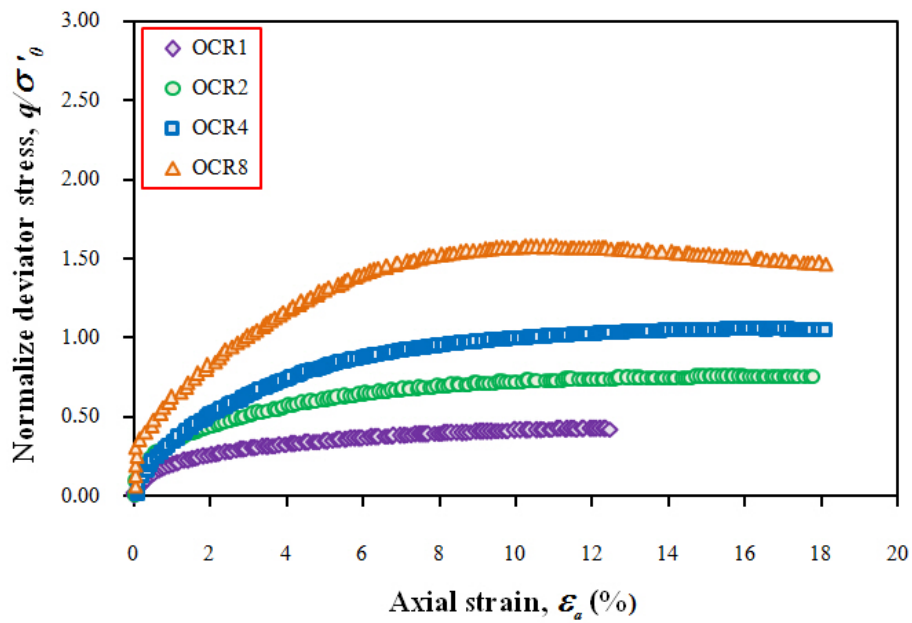
2.4.2.2 ผลการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำ

1) กรณีเปลี่ยนแปลงอัตราความเครียดและค่าอัตราการอัดแน่นเกินตัวต่อค่าความเค้นเบี่ยงเบน

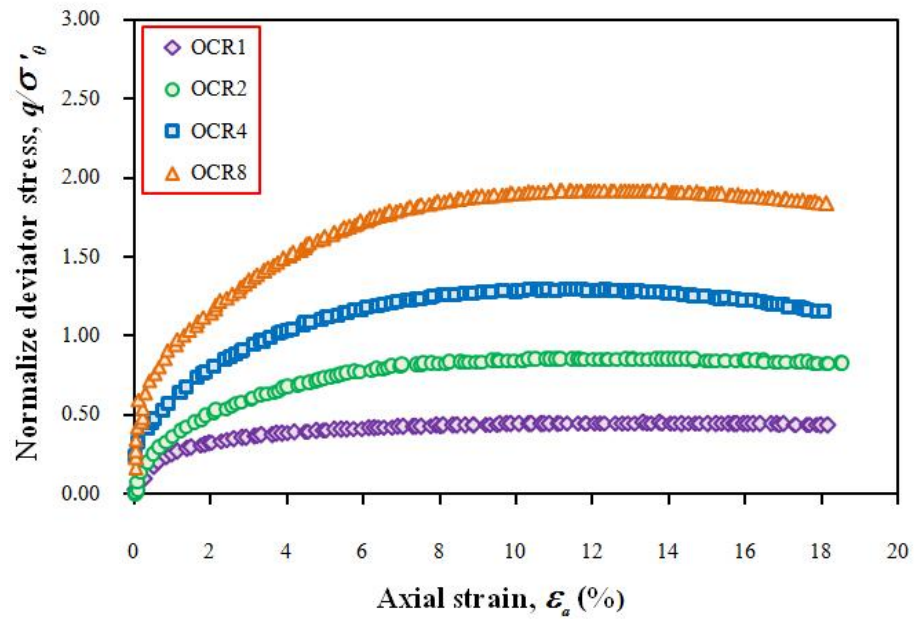
ผลของอัตราความเครียดเดียวกันมาเปรียบเทียบกันในแต่ละค่า OCR ผลที่ได้สามารถนำมาวิเคราะห์ผลกระทบของ OCR ที่มีต่อดินเหนียวปากพวง โดยค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราความเครียดที่มีผลต่อค่า OCR ต่างๆ ได้แสดงในรูปที่ 2.18 ที่อัตราความเครียด 0.02 เปอร์เซ็นต์ต่ออนาที่ ค่า OCR เท่ากับ 8 มีค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงขึ้น 26.08 เปอร์เซ็นต์ ของค่า OCR เท่ากับ 1 แสดงให้เห็นว่าเมื่อค่า OCR เพิ่มสูงขึ้นค่าความเค้นเบี่ยงเบนจะมีค่าเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกัน ที่อัตราความเครียด 0.075 เปอร์เซ็นต์ต่ออนาที่ ค่า OCR เท่ากับ 8 ให้ค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงขึ้น 27.27 เปอร์เซ็นต์ของค่า OCR เท่ากับ 1 แสดงให้เห็นว่าค่าความเค้นเบี่ยงเบนแปรผันกับค่า OCR เช่นเดียวกับที่อัตราความเครียด 0.02 เปอร์เซ็นต์ต่ออนาที่ ที่อัตราความเครียด 1.0 เปอร์เซ็นต์ต่ออนาที่ ค่า OCR เท่ากับ 8 ให้ค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงขึ้น 23.62 เปอร์เซ็นต์ของค่า OCR เท่ากับ 1 ซึ่งค่าความเค้นเบี่ยงเบนในแต่ละค่า OCR เริ่มเห็นความแตกต่างได้อย่างชัดเจนมากกว่าที่อัตราการเงื่อนไข และที่อัตราความเครียด 8.5 เปอร์เซ็นต์ต่ออนาที่ค่า OCR เท่ากับ 8 ให้ค่าความเค้นเบี่ยงเบนสูงขึ้น 22.80 เปอร์เซ็นต์ ของค่า OCR เท่ากับ 1 โดยจะเห็นได้ว่าค่าความเค้นเบี่ยงเบนจะมีเปอร์เซ็นต์ที่เพิ่มขึ้นน้อยกว่า 3 อัตราการเงื่อนไขที่ช้ากว่า เนื่องจากเมื่อเงื่อนไขตัวอย่างที่อัตราการเงื่อนไขที่เร็วมากนั้นอนุภาคของเม็ดดินมีการจัดเรียงตัวขนานกับทิศทางของแถบเงื่อนไข รวมทั้งการที่แรงค้ำน้ำในมวลดินเป็นตัวรับแรงเฉือนในช่วงเริ่มต้นเงื่อนไขตัวอย่างผลการทดสอบที่ได้อาจจะไม่ใช่กำลังรับแรงเฉือนที่แท้จริงของตัวอย่างดินนั่นเอง



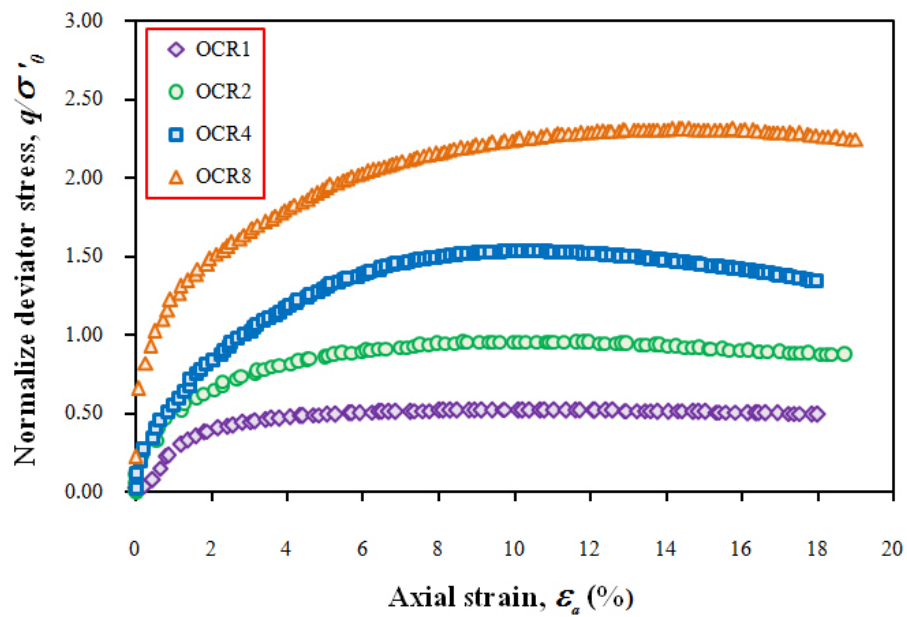
(a)



(b)



(c)

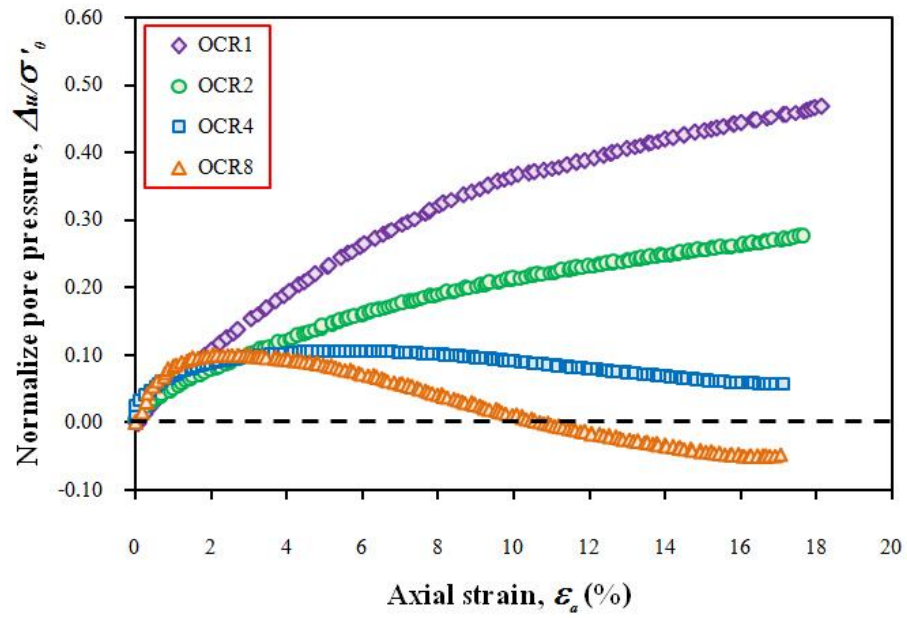


(d)

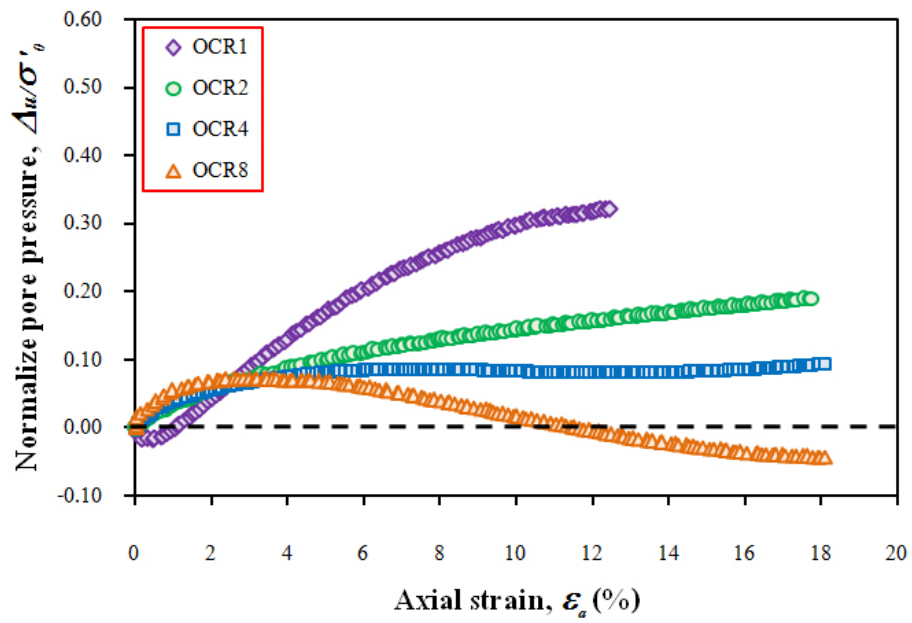
รูปที่ 2.18 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนที่ทำการบรรทัดฐานด้วย
ค่าความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ยกับค่าอัตราความเครียดที่แตกต่างกัน
(a) 0.02 เปอร์เซนต์ต่อนาที (b) 0.075 เปอร์เซนต์ต่อนาที
(c) 1.0 เปอร์เซนต์ต่อนาทีและ (d) 8.5 เปอร์เซนต์ต่อนาที

2) กรณีเปลี่ยนแปลงอัตราความเครียดและค่าอัตราการอัดแน่นเกินตัวต่อค่าแรงดันน้ำส่วนเกิน

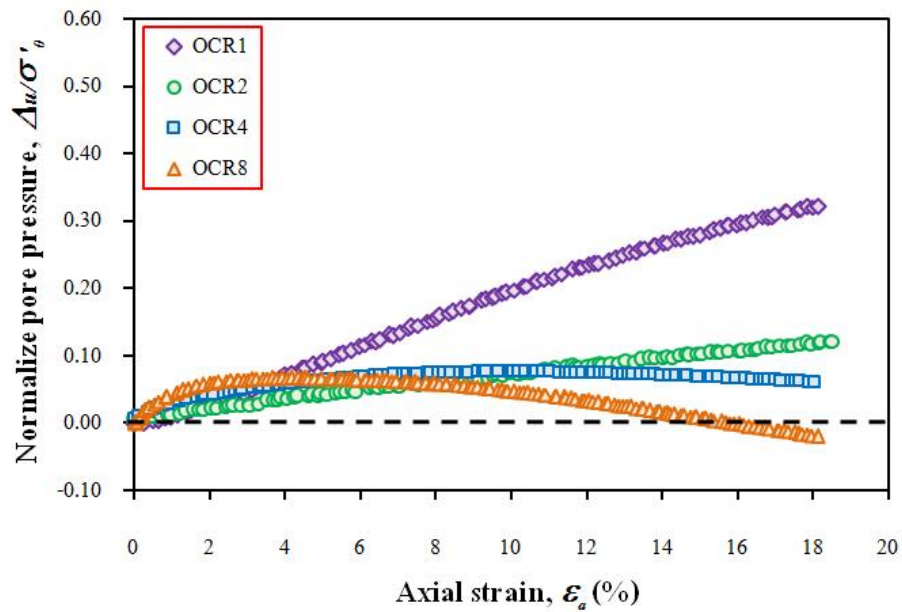
จากผลการทดสอบแรงอัดสามแกนแบบไม่ระบายน้ำ เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกิน (Excess pore - pressure) เมื่อทำการเปลี่ยนแปลงอัตราความเครียดในการเงื่อนไขตัวอย่างดินเหนียวปากผนังที่ค่า OCR เท่ากับ 1 2 4 และ 8 โดยค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่ทำการบรรทัดฐานด้วยความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ยก่อนเงื่อนไขตัวอย่างดิน ค่าความสัมพันธ์ของแรงดันน้ำส่วนเกินที่ทำการบรรทัดฐานค่าด้วยความเค้นประสิทธิผลก่อนเงื่อนไขตัวอย่างมาเปรียบเทียบกันในแต่ละค่า OCR ผลที่ได้พบว่าอัตราความเครียดมีผลต่อค่าการกระจายตัวของแรงดันน้ำในมวลดิน ซึ่งค่าอัตราความเครียดช้าจะมีผลกระทบมากกว่าที่อัตราความเครียดเร็ว โดยที่อัตราความเครียด 0.02 เปอร์เซ็นต์ต่ออนาที่และ 0.075 เปอร์เซ็นต์ต่ออนาที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.19 (a) และ (b) โดยที่การกระจายตัวของน้ำในมวลดินมีลักษณะที่แตกต่างกันได้อย่างชัดเจน ซึ่งค่าแรงดันน้ำส่วนเกินจะเพิ่มขึ้นมากที่สุดที่ค่า OCR เท่ากับ 1 และที่ค่า OCR เท่ากับ 4 ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินจะเพิ่มขึ้นก่อนแล้วค่อยๆ ลดลง ส่วนที่ค่า OCR เท่ากับ 8 ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินจะเพิ่มขึ้นก่อนแล้วค่อยๆ ลดลง จนมีค่าเป็นลบ (ซึ่งได้อธิบายผลมาแล้ว) ที่ค่าอัตราความเครียด 1.0 เปอร์เซ็นต์ต่ออนาที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.19 (c) ค่าแรงดันน้ำเริ่มมีการกระจายตัวลดลง ในทุกๆ ค่า OCR โดยที่ค่า OCR เท่ากับ 8 ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินจะเพิ่มขึ้นก่อนแล้วค่อยๆ ลดลงจนมีค่าเป็นลบเช่นเดียวกับ 2 อัตราความเครียดที่ช้ากว่า และที่อัตราความเครียด 8.5 เปอร์เซ็นต์ต่ออนาที่ได้แสดงไว้ในรูปที่ 2.19 (d) ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นไม่มีความแตกต่างกันแม้ว่าค่า OCR จะเปลี่ยนแปลง แสดงให้เห็นว่าค่าแรงดันน้ำส่วนเกินไม่มีผลกระทบต่ออัตราการเงื่อนไขเร็วนั่นเอง



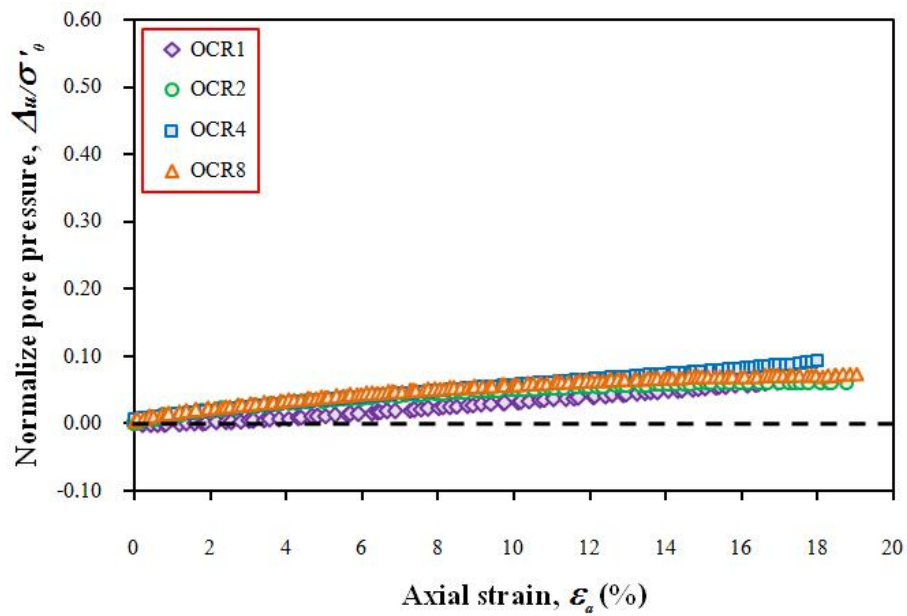
(a)



(b)



(c)



(d)

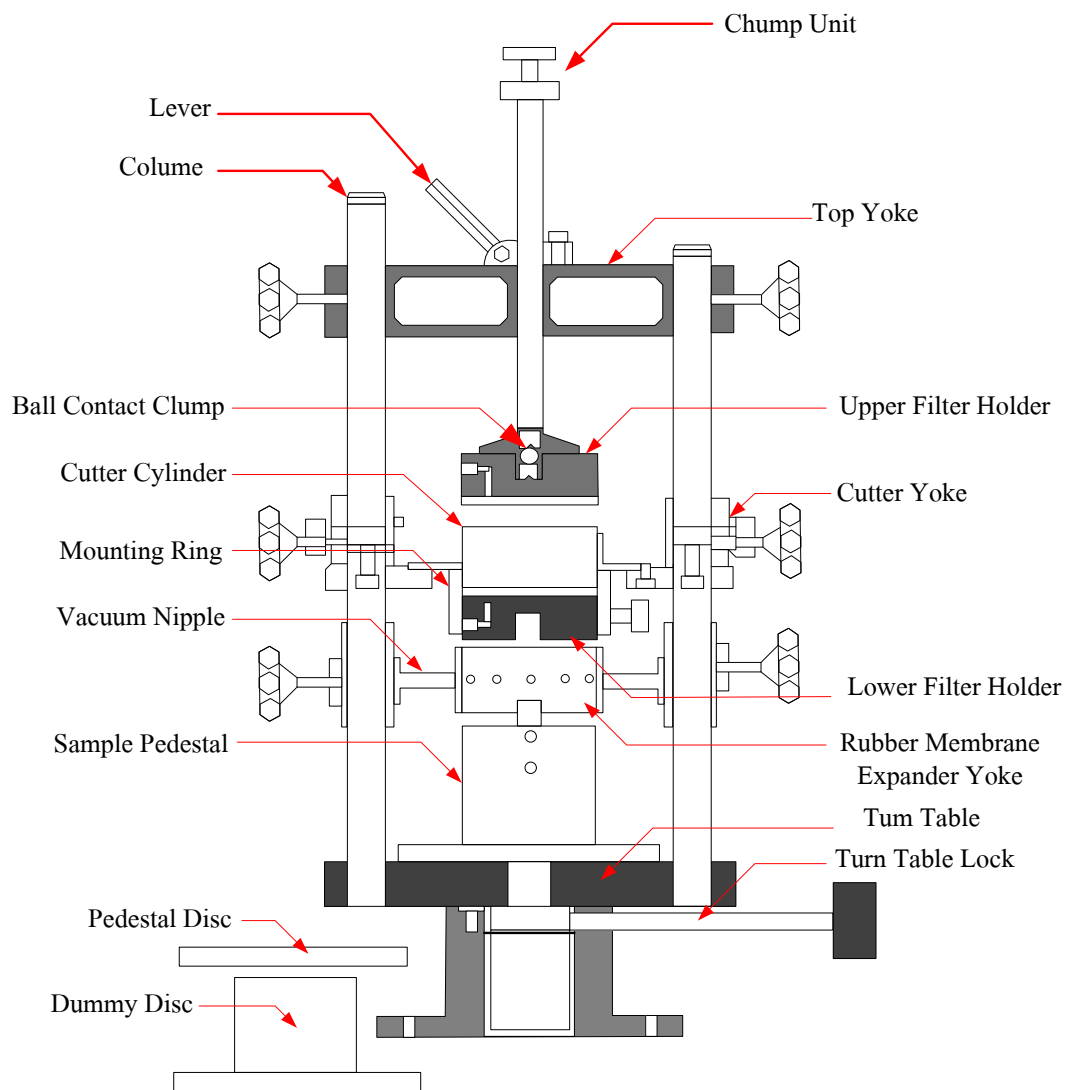
รูปที่ 2.19 ความสัมพันธ์ของแรงดันน้ำส่วนเกินที่ทำการบรรทัดฐานด้วยค่าความเค้นประสิทธิผล
 เหนือกับค่าอัตราความเครียดที่แตกต่างกัน
 (a) 0.02 เปอร์เซ็นต์ต่อนาที (b) 0.075 เปอร์เซ็นต์ต่อนาที
 (c) 1.0 เปอร์เซ็นต์ต่อนาที และ (d) 8.5 เปอร์เซ็นต์ต่อนาที

2.5 การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินโดยเครื่องทดสอบการเฉือนแบบตรงอย่างง่าย (Direct Simple Shear Apparatus)

การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินโดยเครื่องทดสอบการเฉือนแบบตรงอย่างง่าย (Direct Simple Shear Apparatus) เป็นขั้นตอนสำคัญที่จะต้องออกแบบชุดเตรียมตัวอย่างที่สามารถเตรียมตัวอย่างดินคงสภาพได้โดยไม่ให้ถูกรบกวนก่อนการทดสอบ โดยชุดเตรียมตัวอย่างประกอบด้วยอุปกรณ์ต่างๆ ดังรูปที่ 2.20 จากรูปแสดงชุดอุปกรณ์การเตรียมตัวอย่างดินสำหรับการทดสอบการเฉือนแบบตรงอย่างง่ายของบริษัท GEONOR รุ่น Geonor H -12 Direct Simple Shear อุปกรณ์การเตรียมตัวอย่างนี้มีลำดับขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างดิน ดังรูปที่ 2.21

จากรูปที่ 2.21 สามารถอธิบายขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างดินดังนี้

- นำตัวอย่างดินมาวางบนวัสดุแผ่นเรียบ แล้วใช้ชุดตัดดิน (Cutter cylinder) กดลงไปบนตัวอย่างดิน ดังรูป (a) และ (b) ดินที่อยู่ในชุดตัดดิน (Cutter cylinder) คือตัวอย่างดินที่จะใช้ในการทดสอบ ทำการตัดดินที่ล้นขอบบนชุดตัดดินออก
- นำ Mounting ring สวมเข้าบนชุดตัดดินทำการขันให้แน่น แล้วทำการยกทั้งชุดออกไปวางข้างนอกก่อน ดังรูป (c)
- เตรียมยางเสริมลวด (Reinforced Membrane) ที่ใช้หุ้มตัวอย่างดินสวมเข้ากับชุดดูดอากาศ (Vacuum Nipple) ดังรูป (d) แล้วสวมเข้าแทนเตรียมตัวอย่าง
- นำชุดตัดดินที่ได้เอาออกจากแทนเตรียมตัวอย่างก่อนหน้านี้ นำเข้าติดตั้งบนแทนเตรียมตัวอย่าง ดังรูป (e) จากนั้นทำการติดตั้งชุดตัดดินออกแล้วทำการดันดินที่อยู่ในชุดตัดดินออก ดังรูป (f) และ (g)
- ทำการคลี่ยางเสริมลวด (Reinforced Membrane) ออกมาหุ้มดินอย่างดิน ดังรูป (h) และ (i)



รูปที่ 2.20 แสดงส่วนประกอบของชุดเครื่องมือการเตรียมตัวอย่าง (นิรุจน์ 2550)



รูปที่ 2.21 แสดงขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างสำหรับเครื่องทดสอบของบริษัท GEONOR สำหรับการ
ใช้ยางเสริมลวด (Reinforced Membrane) ในการควบคุมปริมาตรคงที่ (Bjerrum and Landva 1966)

2.6 ทฤษฎี SHANSEP

SHANSEP ย่อมาจาก Stress History and Normalized Soil Engineering Properties ที่พัฒนา โดย Ladd and Foott (1974) ที่สถาบัน MIT ประเทศสหรัฐอเมริกาวิธีการของ SHANSEP เป็นวิธีที่ใช้หาค่ากำลังความแข็งแรงของดินเหนียวในสภาพหน่วยแรงรวมหรือ Undrained Shear Strength (S_u) และใช้ได้สำหรับดินเหนียวอ่อน หลักการพื้นฐานของวิธีการนี้ได้จากการตั้งสมมติฐานว่า ค่ากำลังของดินเหนียว (S_u) จะเป็นสัดส่วนกับค่า σ'_{vc} ด้วยคุณสมบัติเช่นนี้ค่า S_u สามารถเขียน ในรูปของสมการดังนี้

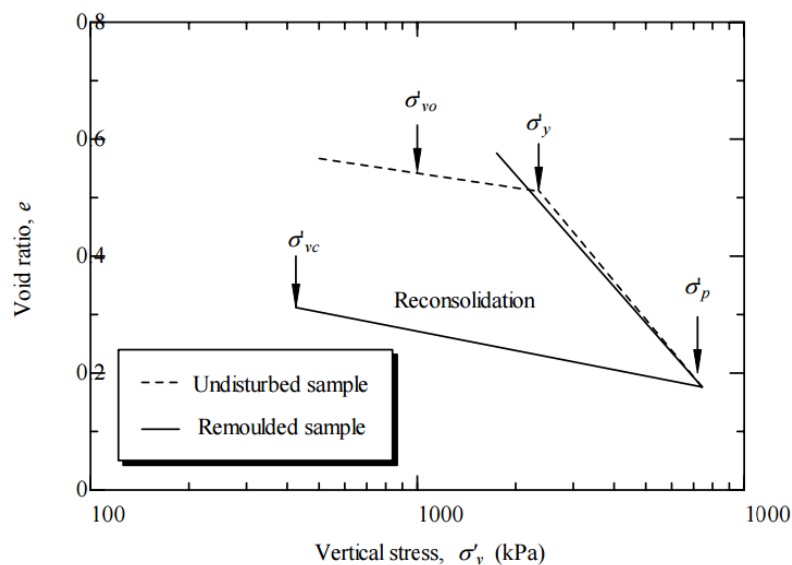
$$\frac{S_u}{\sigma'_{vc}} = S(O.C.R.)^m \quad (2.2)$$

โดยที่

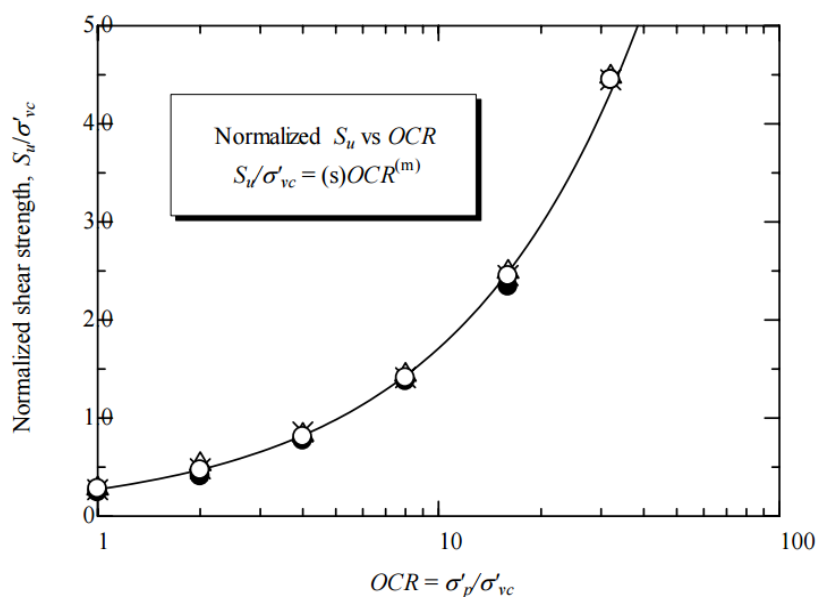
- S_u คือ Undrained Shear Strength ($\phi = 0$)
- σ'_{vc} คือ Effective Overburden Pressure
- S คือ Strength Ratio
- O.C.R. คือ Overconsolidation Ratio
- m คือ 0.7-0.9 Ladd (1977)

ผลทดสอบแรงเฉือนตรงสามารถใช้ในการประมาณกำลังต้านทานแรงเฉือนในสภาพไม่ระบายน้ำด้วยวิธีของ SHANSEP วิธีดังกล่าวมีความสัมพันธ์อยู่ในรูป $S_u / \sigma'_{vc} = (S) OCR^m$ (Jamolkowski et al., 1985) วิธีของ SHANSEP ใช้ได้เฉพาะกับดินที่มีพฤติกรรมดินเหนียวที่สามารถ Normalized ได้เท่านั้น Schmertmann (1955) และ Ladd and Foott (1974) อธิบายว่าดินที่มีพฤติกรรม Normalized ได้ควรเป็นดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสานอัดตัวปกติและดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสานอัดตัวมากกว่าปกติ ดินดังกล่าวเส้นการอัดตัวคายน้ำช่วงหลังความเค้นคราก (yield pressure, σ'_y) ของดินเหนียวคงสภาพจะเป็นเส้นเดียวกันกับดินเหนียวปั้นใหม่ ดังรูปที่ 2.22 หลักการของ SHANSEP มีพื้นฐานว่าค่า OCR ได้จากการอัดตัวคายน้ำในสภาพ K_0 โดยให้ความเค้นกดทับประสิทธิผลสูงสุดที่เคยกดทับในห้องทดลอง (maximum past pressure, σ'_p) มากกว่าความเค้นคราก (σ'_y) Schmertmann (1955) และ Ladd and Foott (1974) แนะนำให้ใช้ $\sigma'_p \approx (1.5-2) \sigma'_y$ หลังจากนั้นจึงลดหน่วยแรงประสิทธิผลลงไปที่ σ'_{vc} เพื่อให้

ได้ \square OCR ที่ต้องการแล้วจึงทำการทดสอบ คำนวณ OCR จาก σ'_p / σ'_{vc} โดยสมมติว่าดินมีพฤติกรรมที่ Normalized ได้ทั้งดินใน สนาม และดินตัวอย่างในห้องปฏิบัติการ หากดินตัวอย่างมีค่า OCR เท่ากัน ถึงจะมีสถานะความเค้น ต่างกันในช่วงก่อนและหลังความเค้นครากดินตัวอย่างจะมีค่า S_u / σ'_{vc} ใกล้เคียงกัน จากการศึกษา ในอดีต (Ladd and Foott, 1974) พบว่าอัตราส่วน S_u / σ'_{vc} จะแปรผันตาม OCR เพียงอย่างเดียว ดังแสดงในรูปที่ 2.23

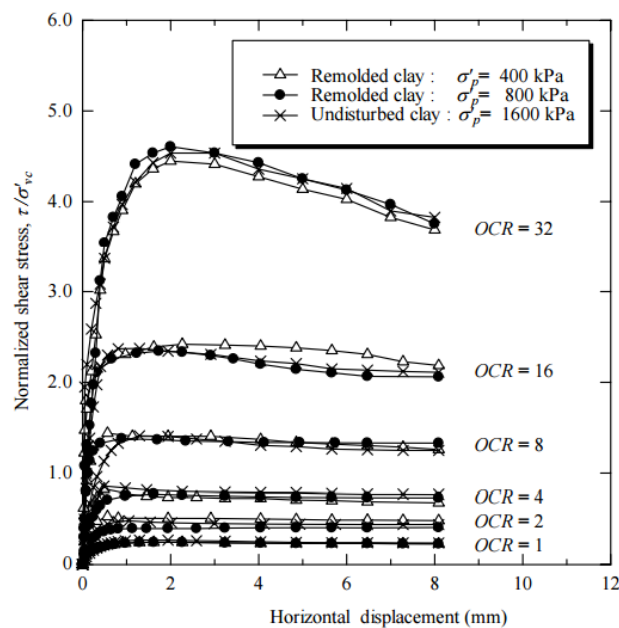


รูปที่ 2.22 หลักการของวิธี SHANSEP (Ladd and Foott, 1974)

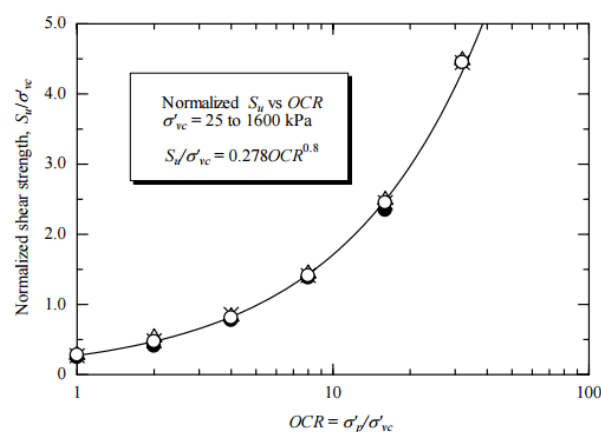


รูปที่ 2.23 การ Normalization ของดินไร้พันธะเชื่อมประสาน

อภิชาติ (2548) ได้ศึกษาคุณสมบัติทางวิศวกรรมในห้องปฏิบัติการของชั้นดินเหนียวปนดินตะกอนในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ผลการศึกษานำมาใช้ในการตรวจสอบการทรุดตัวของฐานราก และใช้ในการออกแบบเสาเข็มกตที่ใช้ในการซ่อมอาคารหอพักสุรนารีเวศ 9 จากการศึกษาพบว่า ดินเหนียวปนดินตะกอนในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี จัดเป็นดินเหนียวไร้พันธะเชื่อมประสานอัดตัวมากกว่าปกติ ความสัมพันธ์ระหว่าง Normalized shear strength กับ อัตราส่วนมากกว่าปกติดังรูปที่ 2.24 เป็นไปตามวิธีของ SHANSEP ดังสมการ $S_u/\sigma'_{vc} = 0.278OCR^{0.80}$



(a)



(b)

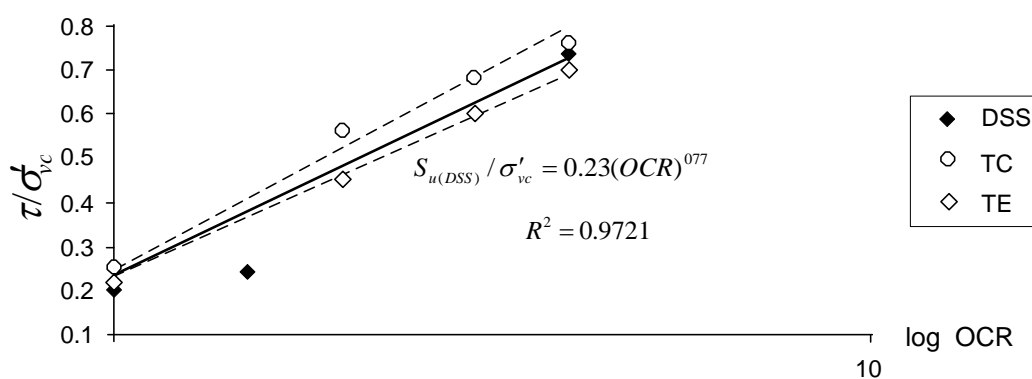
รูปที่ 2.24 Normalized shear stress จากผลทดสอบ CU Direct shear test

(a) Normalized ความเค้นเฉือนด้วยความเค้นกตทับในแนวตั้งประสิทธิผล

(b) ความสัมพันธ์ระหว่าง S_u / σ'_{vc} และ $\log OCR$ ของดินเหนียวปนดินตะกอนในมหาวิทยาลัย

นิรุจน์ (2550) ได้การศึกษาผลกระทบของแรงกระทำแบบทางเดียวที่มีอิทธิพลต่อพฤติกรรมทางกลศาสตร์ของดินเหนียวอ่อนกรุงเทพฯ โดยใช้เครื่องมือทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่าย ตัวอย่างดินเหนียวกรุงเทพฯ เก็บจากระดับความลึก 2.5 – 15.5 เมตร ถูกเตรียมตัวอย่างให้อยู่ในสภาพอิ่มตัวด้วยน้ำ กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำด้วยวิธี SHANSEP จากการศึกษาพบว่า กราฟความสัมพันธ์ในการประมาณกำลังรับแรงเฉือนอย่างง่ายแบบไม่ระบายน้ำด้วยวิธี SHANSEP ซึ่งสามารถสร้างสมการความสัมพันธ์ได้ คือ $S_{u(DSS)} / \sigma'_{vc} = 0.23(OCR)^{0.77}$

ดังรูปที่ 2.25



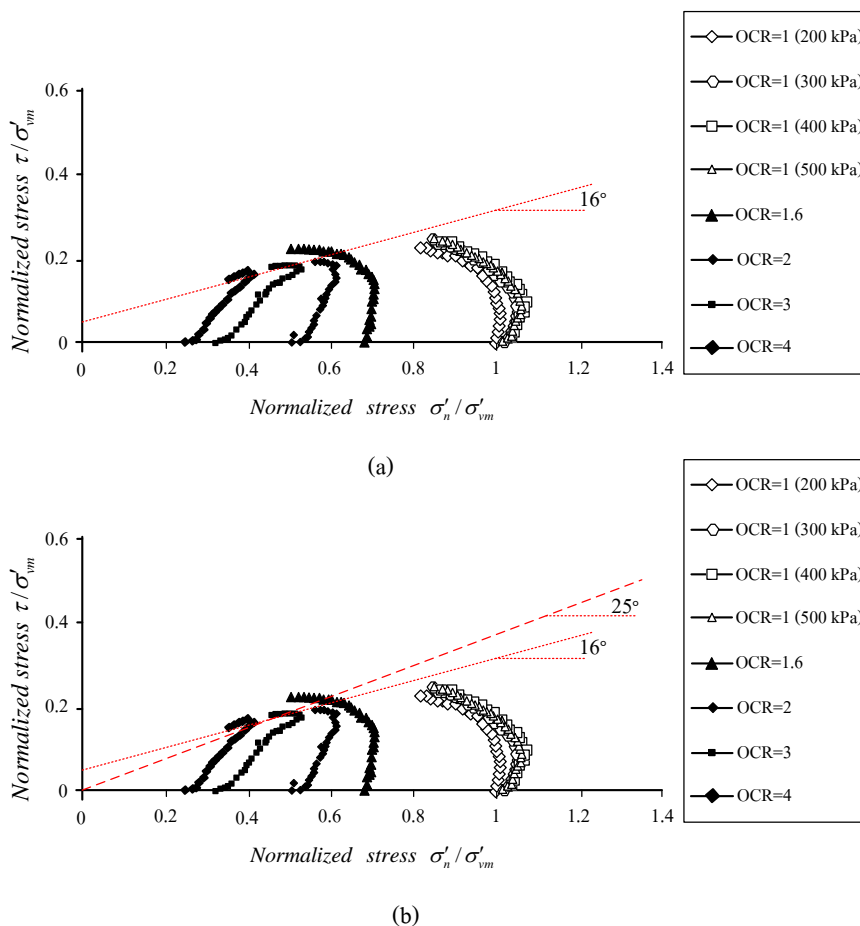
รูปที่ 2.25 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับค่าการอัดตัวแน่นเกินตัว (SHANSEP)

2.7 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ธวัชชัย (2548) ได้ศึกษาเครื่องมือการเฉือนแบบตรงอย่างง่ายสำหรับดินเหนียว โดยใช้เครื่องมือทดสอบชนิดใหม่ล่าสุดของ Geonor และศึกษาข้อดีและข้อจำกัดของเครื่องมือการเฉือนแบบตรงอย่างง่ายในการนำมาทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมด้านความเค้น-ความเครียด และกำลังรับแรงเฉือนของดิน การทดสอบใช้หลักการ Recompression คือ ใช้ค่าหน่วยแรงสูงสุดที่กระทำในขบวนการยุบอัดตัวคายน้ำก่อนกระทำแรงเฉือน มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับหน่วยแรงกดทับสูงสุดที่เคยเกิดขึ้นในอดีต (100 kPa) ทำให้ได้ค่าอัตราส่วนการยุบอัดแน่นเกินตัว (OCR) เท่ากับ 1.0 ตัวอย่างที่ใช้สำหรับทดสอบการเฉือนแบบตรง มีพื้นที่หน้าตัด 35 ตารางเซนติเมตรและสูง 16 มิลลิเมตร ขั้นตอนแรก คือ การทดสอบการยุบอัดตัวคายน้ำในสภาพ 1 มิติ ขั้นตอนที่สอง คือ กระทำแรงเฉือนกับตัวอย่างดิน โดยการเปลี่ยนค่าหน่วยแรงกดในแนวตั้งระหว่างที่หน่วยแรงเฉือนกระทำต่อตัวอย่างเพื่อไม่ให้มีแรงดันส่วนเกิน และการเปลี่ยนแปลงปริมาตรกำหนดอัตราเร็วในการ

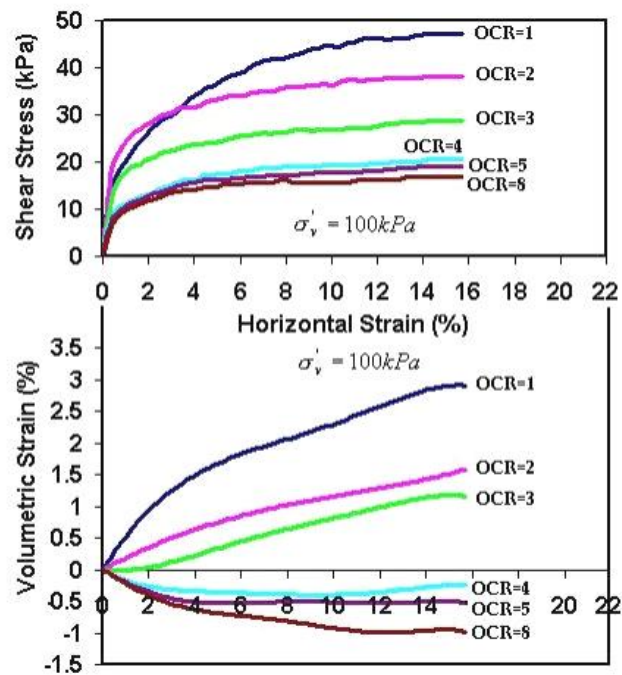
เงื่อนไขที่ 5 เปรอ์เซ็นต์ของความสูงตัวอย่างต่อชั่วโมง จนกระทั่งตัวอย่างดินวิบัติ หลักการสำคัญของเครื่องมือนี้ คือ การใช้แผ่นยางเสริมลวดเหล็ก หุ้มตัวอย่างดินก่อนการทดสอบ เพื่อให้เกิดการเสียรูปแบบ Simple Shear ทำให้ความเค้น-ความเครียดสม่ำเสมอตลอดทั้งตัวอย่าง ข้อดีของเครื่องมือคือ การใช้ระบบควบคุมแบบอัตโนมัติเพื่อควบคุมให้ความสูงของตัวอย่างคงที่ ทำให้เกิดการเลื่อนตัวอย่างดินในสภาพไม่ระบายน้ำ ส่วนข้อจำกัดของเครื่องมือ คือ ขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างดินก่อนทดสอบ ยุ่งยาก สลับซับซ้อนต้องใช้ความประณีต โดยเฉพาะช่วงการใส่แผ่นยางเสริมลวดเหล็กเพื่อหุ้มตัวอย่างดินอีกประการหนึ่งแผ่นยางเสริมลวดเหล็กที่ใช้ต้องนำเข้าจากต่างประเทศเท่านั้น ยังไม่สามารถผลิตได้ในประเทศ ทำให้มีราคาแพงมาก ดังนั้นการนำเครื่องมือการเลื่อนแบบตรงมาทดสอบเพื่อหาคุณสมบัติทางด้านวิศวกรรมของดิน อาจจะไม่เหมาะสมในทางปฏิบัติ

นิรุจน์ (2550) ได้การศึกษาผลกระทบของแรงกระทำแบบทางเดียว ก่อนที่จะทำการเลื่อนไม่ระบายน้ำ การเลื่อนแบบทางเดียวจะกระทำที่อัตราความเครียดเลื่อนเท่ากับ 5% ต่อชั่วโมง จนกระทั่งความเครียดเลื่อนเท่ากับ 20 % โดยทดสอบกับตัวอย่างดินอัดแน่นปกติ 4 ตัวอย่างที่ระดับความเค้นในแนวดิ่ง เท่ากับ 200 300 400 และ 500 kPa ตามลำดับ และทดสอบกับตัวอย่างดินอัดแน่นกว่าปกติ 4 ตัวอย่าง ที่มีอัตราส่วนการอัดตัวแน่นเกินตัว (OCR) เท่ากับ 1.5 2 3 และ 4 ตามลำดับ นำผลการทดสอบแบบทางเดียวมาวิเคราะห์หาค่าพารามิเตอร์ของสมการที่ใช้ประมาณค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำด้วยวิธี SHANSEP จากการศึกษาพบว่า กราฟความสัมพันธ์ในการประมาณกำลังรับแรงเฉือนอย่างง่ายแบบไม่ระบายน้ำด้วยวิธี SHANSEP ซึ่งสามารถสร้างสมการความสัมพันธ์ได้ คือ $S_{u(Dss)} / \sigma'_{vc} = s(OCR)^m$ และคำนวณพารามิเตอร์ของกำลังตามทฤษฎีการวิบัติของ มอร์-คูลอมป์ ซึ่งได้ค่าดังนี้ $c' = 33.35$ kPa และ $\phi' = 16^\circ$ ดังรูปที่ 2.26 (a) สำหรับการทดสอบในตัวอย่างแบบการอัดตัวแน่นปกติสามารถประมาณเส้นการวิบัติ (k_f - line) โดยต้องทำการประมาณค่าทางเดินของความเค้นเพิ่มเติม เนื่องจากดินเหนียวกรุงเทพฯมีความเป็นพลาสติกสูงมาก การทดสอบของตัวอย่างทดสอบแบบการอัดตัวแน่นปกติที่ทำการเลื่อนจนกระทั่งความเครียดเลื่อนมีค่าเท่ากับ 20% ตัวอย่างทดสอบยังไม่ถึงจุดวิบัติประกอบกับข้อจำกัดของเครื่องมือทดสอบเอง แผ่นยางเสริมลวดเหล็กที่หุ้มตัวอย่างทดสอบอาจเกิดความเสียหายหากทดสอบที่ความเครียดเลื่อนสูงกว่านี้ จึงทำให้มีการประมาณค่าเส้นทางเดินของความเค้นเพิ่มไปจนกระทั่งสัมผัสกับเส้นวิบัติ ดังรูปที่ 2.26 (b) โดยสมมุติว่าค่า $\phi'_{NC} = 25^\circ$

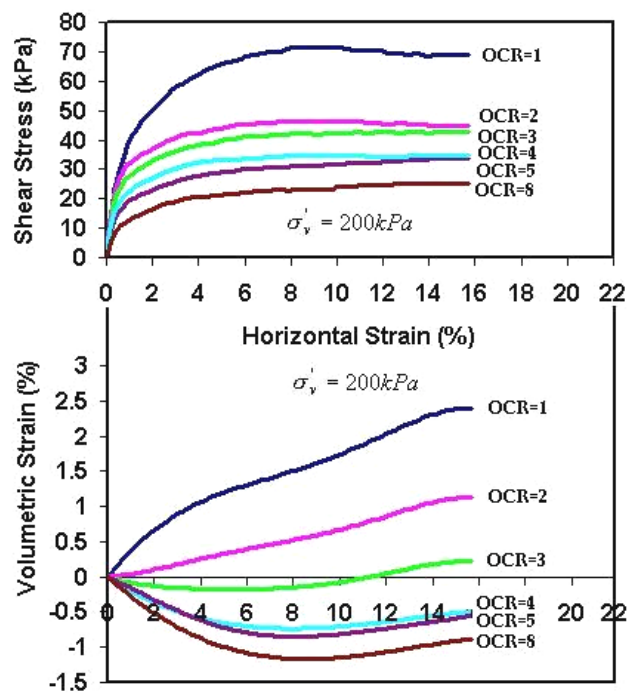


รูปที่ 2.26 แสดง Normalized Stress Path ของการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบทางเดียว

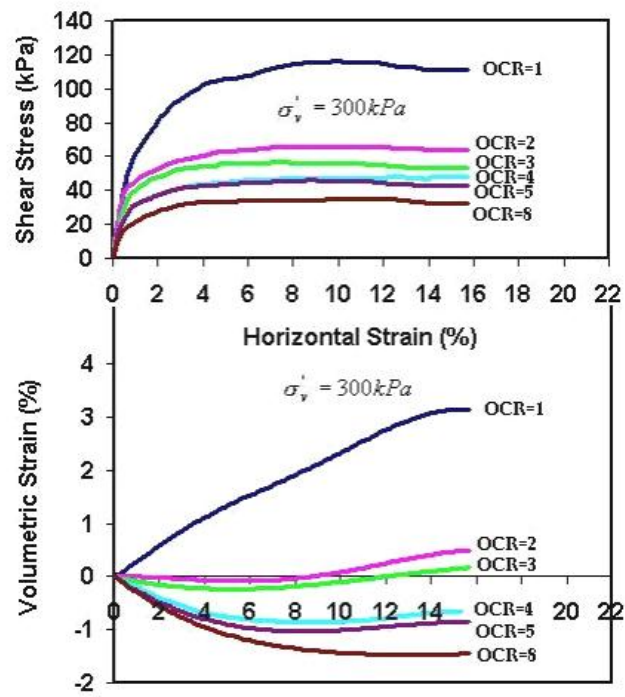
T. Sivadas (2008) ศึกษากำลังรับแรงและคุณสมบัติการเสีรูปร่างของดินเหนียวอ่อนเตรียมใหม่ของประเทศมาเลเซีย ที่มีความเป็นตะกอนสูงโดยใช้เครื่องทดสอบแรงเฉือนตรงอย่างง่าย ควบคุมโดยคอมพิวเตอร์อัตโนมัติทดสอบภายใต้เงื่อนไขการระบายน้ำ โดยตัวอย่างที่เตรียมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 70 มิลลิเมตร ทำการทดสอบที่ระดับความเค้นในแนวตั้ง เท่ากับ 100 200 และ 300 kPa ตามลำดับ และทดสอบกับตัวอย่างดินอัดแน่นกว่าปกติ 6 ตัวอย่าง ที่มีอัตราส่วนการอัดตัวแน่นเกินตัว (OCR) เท่ากับ 1 2 3 4 5 และ 6 ตามลำดับ จากการศึกษาพบว่า พฤติกรรมของดินที่การอัดตัวแน่นปกติ ต่างๆ มีค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินที่แตกต่างกัน ค่าอัดตัวแน่นเกินตัวที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินลดลง ค่าความเค้นในแนวตั้งเพิ่มขึ้นค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินจะเพิ่มขึ้นตาม ดังรูปที่ 2.27 2.28 และ 2.29 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาตรภายใต้ความเค้นในแนวตั้ง เท่ากับ 100 kPa 200 kPa และ 300 kPa



รูปที่ 2.27 ความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาตรภายใต้ความเค้นในแนวตั้ง เท่ากับ 100 kPa



รูปที่ 2.28 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาตรภายใต้ความเค้นในแนวตั้ง เท่ากับ 200 kPa

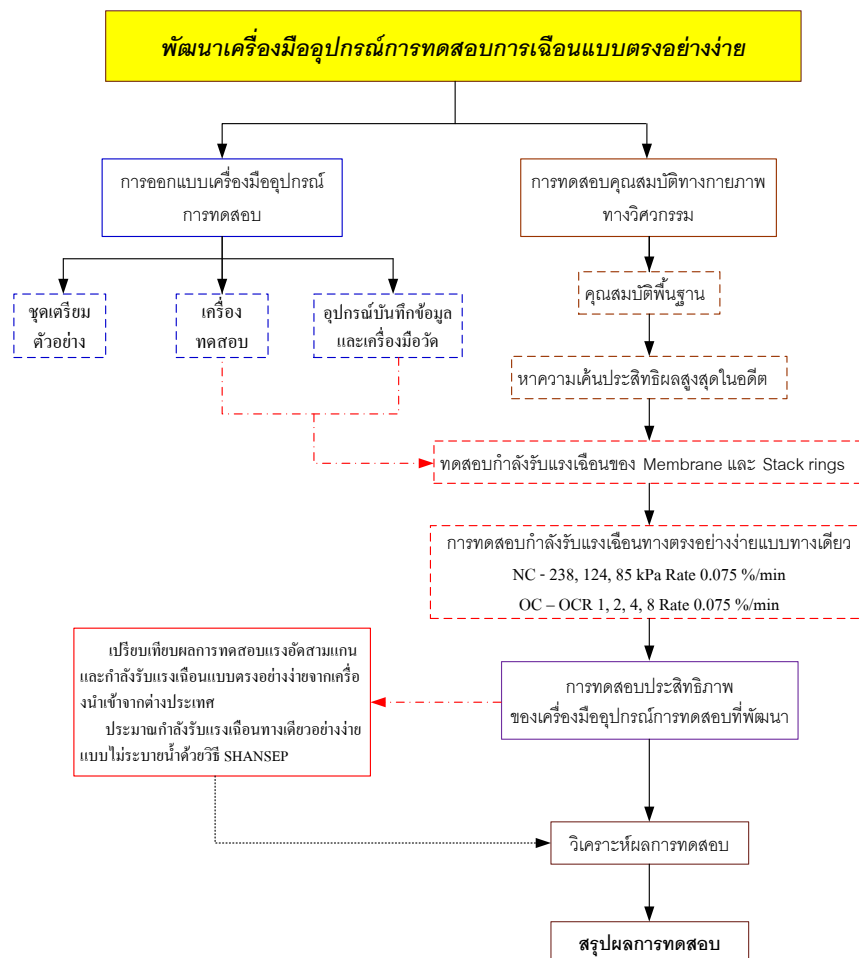


รูปที่ 2.29 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนและอัตราการเปลี่ยนแปลงปริมาตรภายใต้ความเค้นในแนวตั้ง เท่ากับ 300 kPa

บทที่ 3

วิธีดำเนินการวิจัย

วิทยานิพนธ์นี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและพัฒนาเครื่องมืออุปกรณ์การทดสอบ การเงื่อนไขแบบตรงอย่างง่าย โดยขั้นตอนการดำเนินงานสามารถแบ่งได้เป็น 4 ส่วน คือ การออกแบบ เครื่องมืออุปกรณ์การทดสอบการเงื่อนไขแบบตรง การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ (Index properties) การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม (Engineering properties) การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องมืออุปกรณ์การทดสอบการเงื่อนไขแบบตรง และการประมาณกำลังรับแรง เงื่อนไขเดียวอย่างง่ายแบบไม่ระบายน้ำด้วยวิธี SHANSEP (Stress History and Normalized Soil Engineering Properties) ดังแสดงในรูปที่ 3.1



รูปที่ 3.1 แสดงแผนภูมิจำแนงงานวิจัย

3.1 การออกแบบเครื่องมืออุปกรณ์การทดสอบการเหือนแบบตรงอย่างง่าย

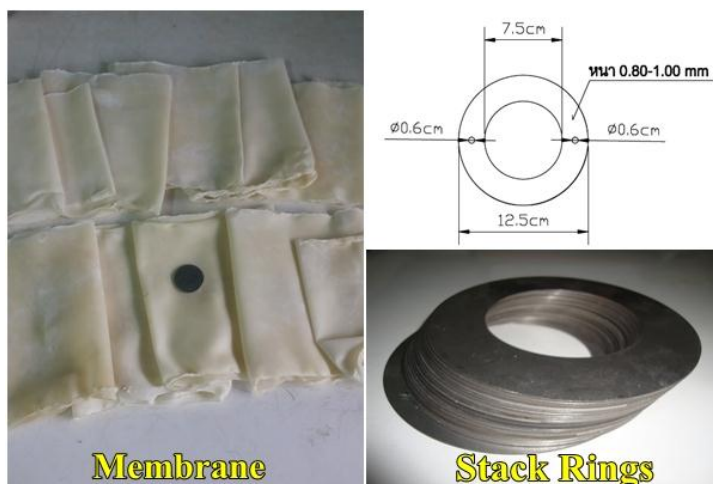
การทดสอบกำลังรับแรงเหือนของดิน โดยเครื่องทดสอบการเหือนแบบตรงอย่างง่าย เริ่มจากการเตรียมตัวอย่างดินสำหรับการทดสอบ จากนั้นนำตัวอย่างดินที่เตรียมไว้ นำมาขึ้นเครื่องทดสอบ การทดสอบมีเงื่อนไขการควบคุมปริมาตรให้คงที่ตลอดการทดสอบ โดยทั่วไปอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมปริมาตรให้คงที่มี 2 อย่างคือ การใช้เมนเบรนเสริมลวด (Reinforced Membrane) และการใช้สแตคริง (Stack rings) สำหรับงานวิจัยนี้จะใช้การใช้สแตคริงในการควบคุมปริมาตรให้คงที่ระหว่างการทดสอบ ดังนั้นการออกแบบเครื่องมืออุปกรณ์การทดสอบการเหือนแบบตรงอย่างง่ายสามารถแยกย่อยขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.1.1 การออกแบบชุดอุปกรณ์การเตรียมตัวอย่าง

เครื่องมืออุปกรณ์การเตรียมตัวอย่างที่สามารถเตรียมตัวอย่างดินคงสภาพได้ทั้งดินเหนียว ดินตะกอนทราย สำหรับใช้ในการพัฒนาเครื่องมืออุปกรณ์การทดสอบการเหือนแบบตรงอย่างง่ายถูกสร้างขึ้นมาจากวัสดุที่หาได้ในประเทศ ดังรูปที่ 3.2 ตัวอย่างภายหลังจากเตรียมมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 72.5 มิลลิเมตร สูง 28.00 มิลลิเมตร หุ้มด้วยเมนเบรนและสแตคริงดังรูปที่ 3.3



รูปที่ 3.2 ชุดอุปกรณ์การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบการเหือนแบบตรงอย่างง่าย

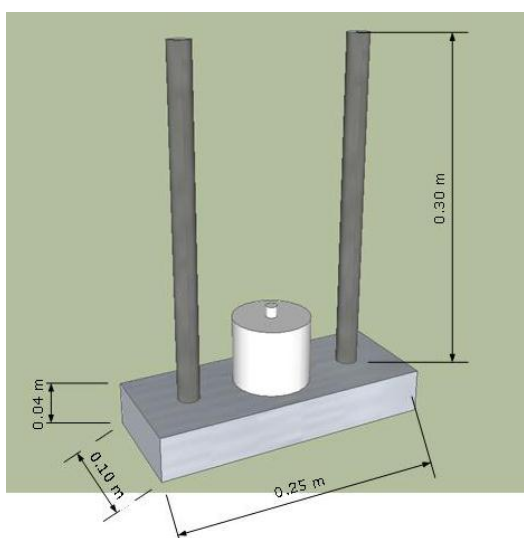


รูปที่ 3.3 แสดงเมมเบรนและสแตคริงสำหรับเตรียมตัวอย่าง

อุปกรณ์ที่เตรียมตัวอย่างถูกออกแบบมาเพื่อสามารถเตรียมตัวอย่างคงสภาพได้ทั้งดินเหนียว ทรายและดินตะกอน โดยชุดอุปกรณ์การเตรียมตัวอย่าง ประกอบด้วยดังนี้

3.1.1.1 แท่นเตรียมตัวอย่าง

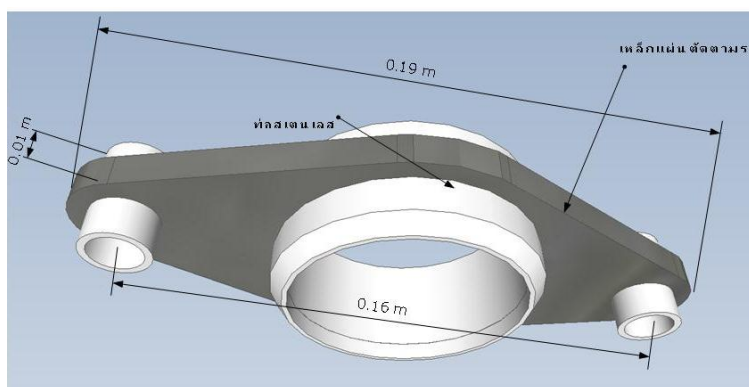
แท่นเตรียมตัวอย่างอุปกรณ์หลักในการเตรียมตัวอย่าง ประกอบด้วย ฐานที่มีเสาเหล็ก 2 เสายึดติดทำหน้าที่เป็นตัวกำหนดแนว แท่นวางตัวอย่างทำจากเหล็กเพลากลมตรงกลางมีเดือยทำหน้าที่เป็นตัวยึดฐานล่าง (Bottom) ของตัวอย่างดินไม่ให้เคลื่อนที่ ดังรูปที่ 3.4



รูปที่ 3.4 แสดงแบบแท่นเตรียมตัวอย่าง

3.1.1.2 อุปกรณ์ตัดตัวอย่าง

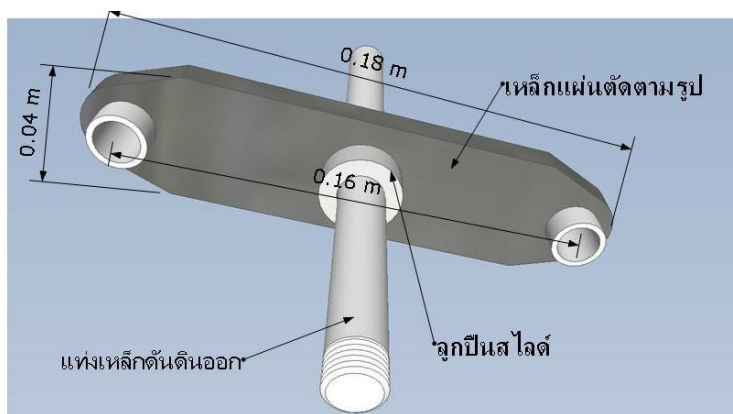
ขนาดของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบถูกกำหนดโดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอุปกรณ์ตัดตัวอย่าง โดยอุปกรณ์ตัดตัวอย่างนี้ประกอบด้วยแผ่นเหล็กตัดตามรูป ยึดติดกับท่อ สเตนเลสกลวงที่สามารถสวมเข้าแท่นเตรียมตัวอย่างได้เพื่อเป็นแนวในการตัดตัวอย่างและโดยท่อสเตนเลสกลวงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 72.5 มิลลิเมตร สูง 28 มิลลิเมตร ดังรูป 3.5



รูปที่ 3.5 แสดงอุปกรณ์ตัดตัวอย่าง

3.1.1.3 อุปกรณ์ดันตัวอย่างออกจากอุปกรณ์ตัดตัวอย่าง

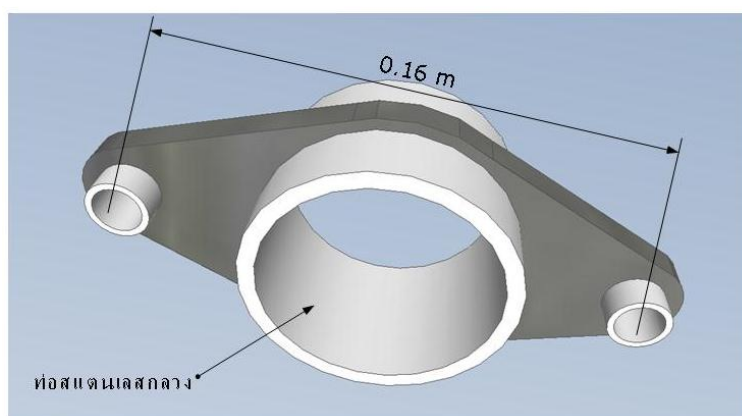
ชุดดันตัวอย่างทำหน้าที่ในการดันตัวอย่างภายหลังจากตัดตัวอย่างด้วยอุปกรณ์ตัดแล้ว มีลักษณะเป็นแท่งเหล็กที่ยึดด้วยเกลียวกับฝาบน (Top cab) ของตัวอย่างเคลื่อนขึ้นลงตามรางลูกปืนสไลด์ที่ติดกับแผ่นเหล็กที่สามารถสวมเข้ากับเสาของแท่นเตรียมตัวอย่าง ดังรูป 3.6



รูปที่ 3.6 แสดงชุดดันตัวอย่าง

3.1.1.4 อุปกรณ์ช่วยสวมยางหุ้มตัวอย่าง

ชุดสวมยางหุ้มตัวอย่างเป็นอุปกรณ์ในการช่วยให้การหุ้มตัวอย่างทำให้ตัวอย่างถูกรบกวนน้อยที่สุด โดยอุปกรณ์หุ้มตัวอย่างดินนี้มีลักษณะเป็นท่อสแตนเลสกลางยึดติดกับเหล็กแผ่นที่สวมเข้ากับเสาของแท่นเตรียมตัวอย่าง ตรงกลางของท่อสแตนเลสทำการเจาะรูปไว้สำหรับต่อกับสายยางไว้ดูอากาศทำให้ถุงยางหุ้มตัวอย่างแนบสนิทกับชุดสวมยางหุ้มตัวอย่างดินดังรูปที่ 3.7

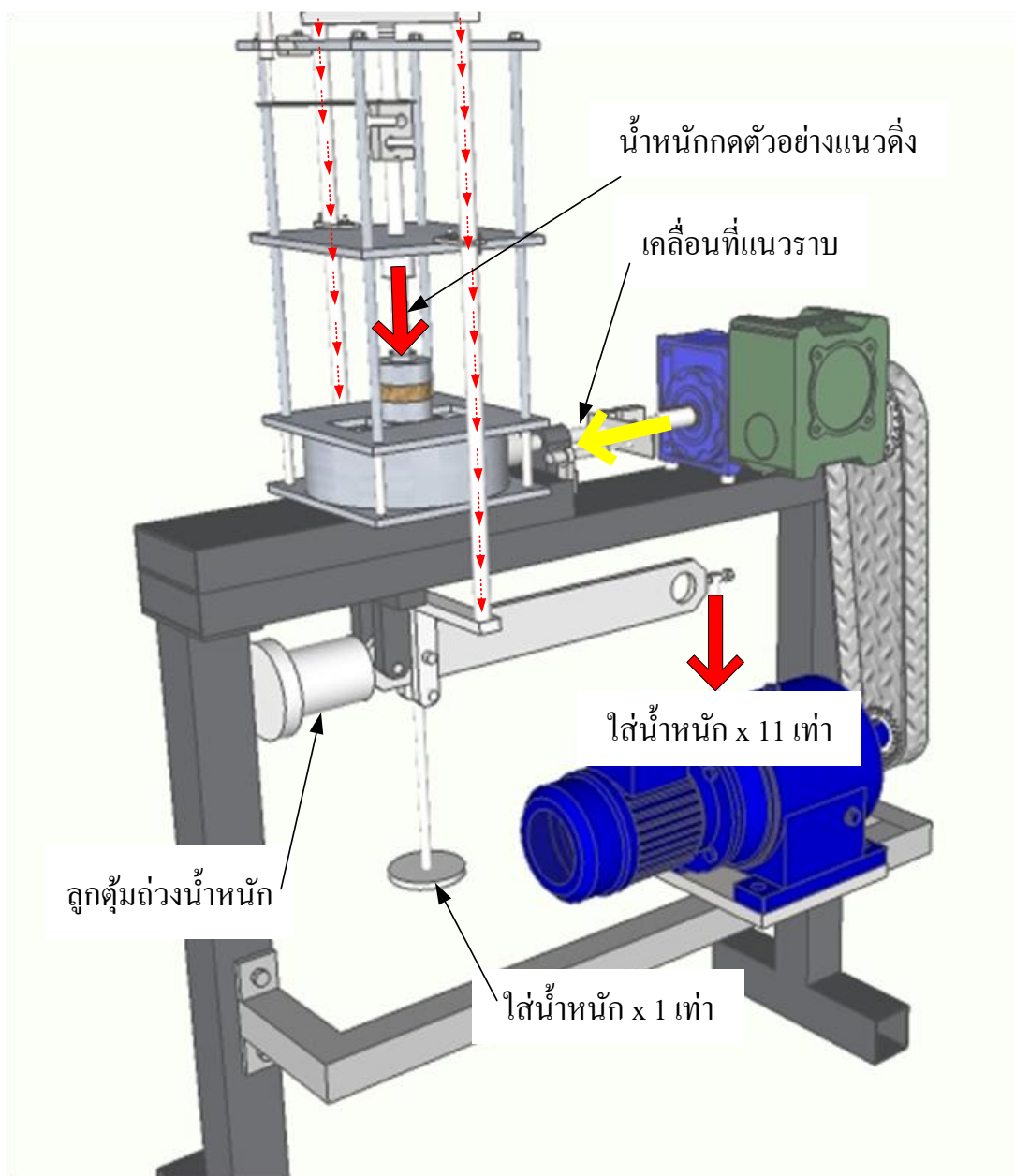


รูปที่ 3.7 แสดงอุปกรณ์สวมยางหุ้มตัวอย่างดิน

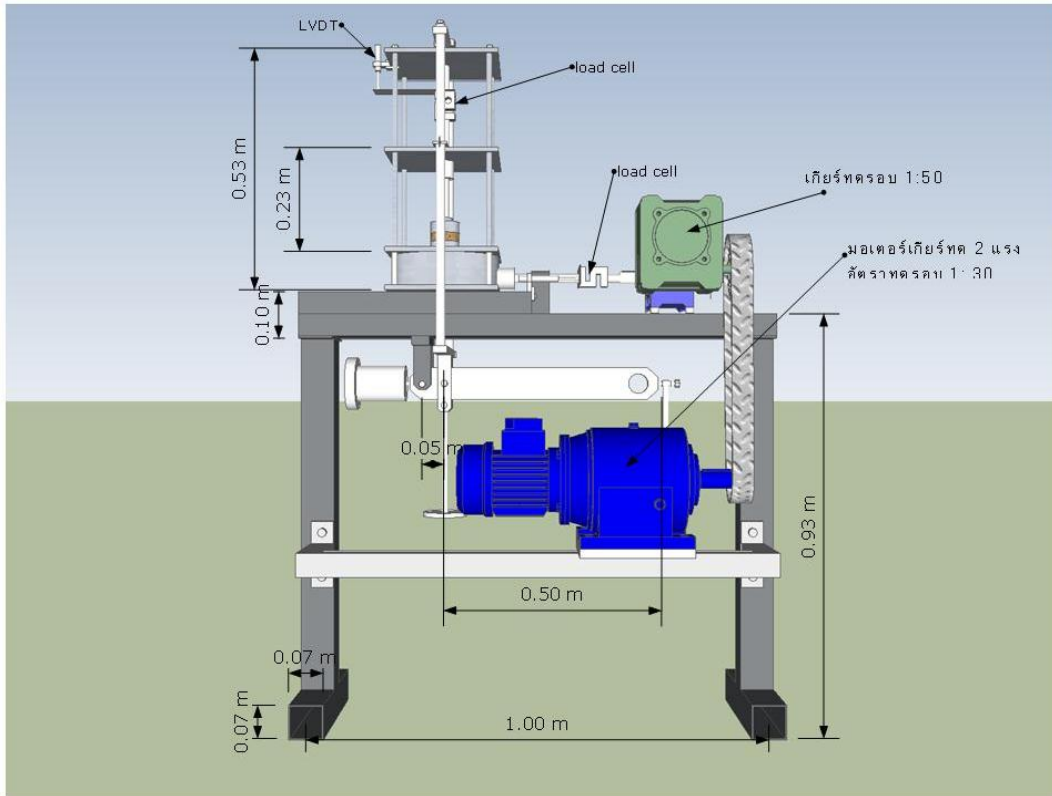
3.1.2 การออกแบบเครื่องทดสอบการเฉือนแบบตรงอย่างง่าย (Direct Simple Shear Apparatus)

การออกแบบเครื่องทดสอบโดยยึดหลักการตามมาตรฐานของ ASTM D 6525-00 (Standard Test Method for Consolidated Undrained Direct Simple Shear Testing of Cohesive Soils) โดยหลักการทำงานของเครื่องทดสอบการเฉือนแบบตรงอย่างง่ายนี้ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ การให้น้ำหนักกดตัวอย่างดินและการเฉือนตัวอย่างดิน โดยในส่วนการให้น้ำหนักกดดินนี้สามารถทำได้โดยใช้หลักการคานงัดเช่นเดียวกับการให้น้ำหนักกดของการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation Test) ในส่วนการเฉือนตัวอย่างดิน จะใช้มอเตอร์ที่สามารถปรับความเร็วรอบต่ำได้พร้อมทั้งการใช้ชุดเกียร์ทดรอบต่อเข้ากับมอเตอร์เพื่อทำให้ความเร็วในการเฉือนสามารถเฉือนด้วยความเร็วที่ช้ามากๆ ได้ ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีของการทดสอบ โดยเครื่องทดสอบการเฉือนแบบตรงอย่างง่าย (Direct Simple Shear Apparatus) ที่สร้างขึ้นดังรูปที่ 3.8 จากรูปการให้น้ำหนักกดตัวอย่างดินในแนวดิ่งจะใช้หลักการคานงัด ซึ่งมีอัตราส่วน 1:11 ติดตั้งอุปกรณ์วัดในการเคลื่อนตัว 2 ตัว เพื่อวัดค่าการเคลื่อนตัวในแนวดิ่งและแนวราบ สำหรับขั้นตอนการเฉือนตัวอย่างดินจะใช้

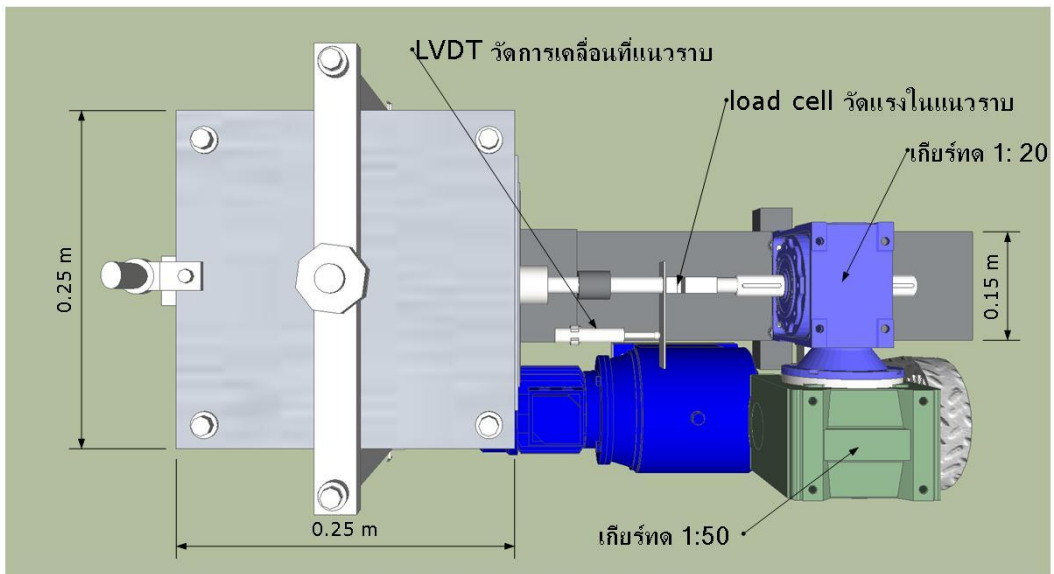
มอเตอร์เกียร์ ขนาด 2 แรงม้า อัตราการทดรอบ 1:30 ต่อเข้ากับชุดเกียร์ทดรอบ(Worm Gear) ที่มีอัตราทดรอบ 1:50 และ 1:20 เพื่อสามารถทำการเนียนตัวอย่างดีด้วยอัตราการเนียนที่กำหนด ติดตั้งอุปกรณ์วัดค่าแรงกดในแนวตั้งและแนวราบ ดังแสดงในรูปที่ 3.9 ถึง 3.12



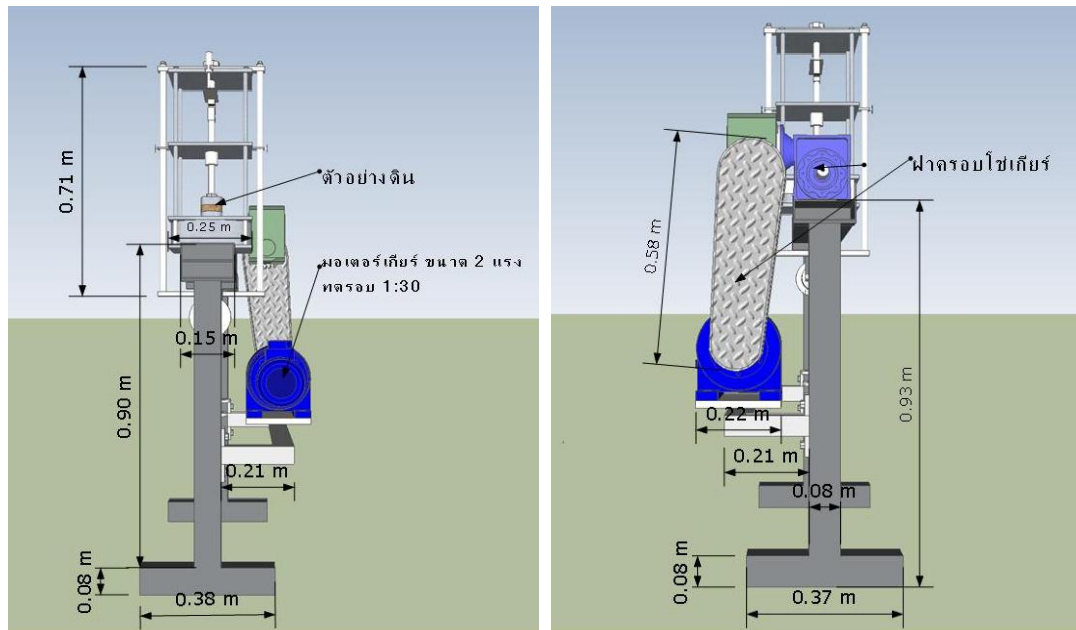
รูปที่ 3.8 แสดงภาพร่างของเครื่องทดสอบการเนียนแบบตรงอย่างง่าย



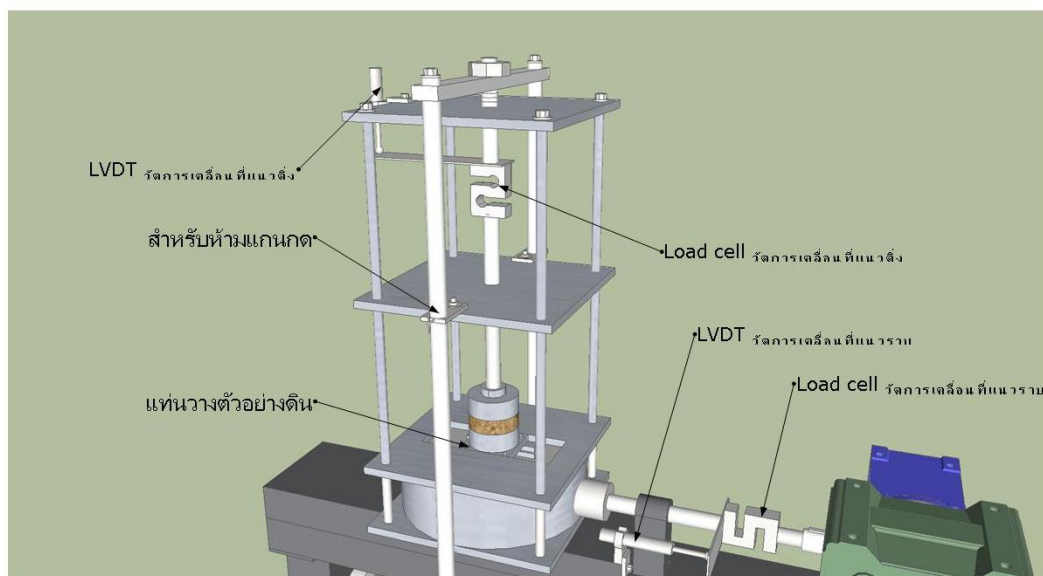
รูปที่ 3.9 แสดงเครื่องทดสอบการเฉือนแบบตรงอย่างง่ายมุมมองด้านหน้า



รูปที่ 3.10 แสดงเครื่องทดสอบการเฉือนแบบตรงอย่างง่ายมุมมองด้านบน



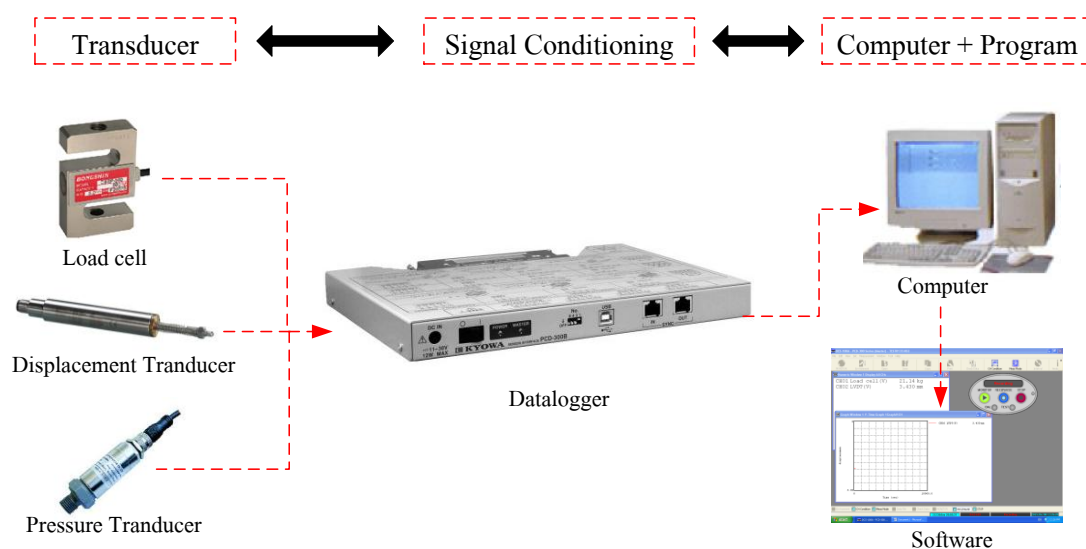
รูปที่ 3.11 แสดงเครื่องทดสอบการเคียนแบบตรงอย่างง่ายมุมมองด้านซ้ายและด้านขวา



รูปที่ 3.12 แสดงหลักการทำงานของเครื่องทดสอบการเคียนแบบตรงอย่างง่าย

3.1.3 อุปกรณ์บันทึกข้อมูลและเครื่องมือวัดสำหรับเครื่องทดสอบการเฉือนแบบตรงอย่างง่าย (Direct Simple Shear Apparatus)

อุปกรณ์บันทึกข้อมูลและเครื่องมือวัดเป็นส่วนสำคัญในการทดสอบ ข้อมูลการทดสอบจะมีความเที่ยงตรงมากหรือน้อย ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของเครื่องมือวัดและอุปกรณ์บันทึกข้อมูล ซึ่งในการพัฒนาเครื่องทดสอบการเฉือนแบบตรงอย่างง่ายขึ้นมาได้มีการออกแบบระบบการบันทึกและรวบรวมข้อมูลดังรูปที่ 3.13



รูปที่ 3.13 แสดงระบบการบันทึกและรวบรวมข้อมูลสำหรับการทดสอบการเฉือนแบบตรงอย่างง่าย

เครื่องทดสอบการเฉือนแบบตรงอย่างง่าย (Direct Simple Shear Apparatus) มีการติดตั้งดังแสดงในรูปที่ 3.13 โดยอุปกรณ์บันทึกข้อมูลและเครื่องมือวัดดังนี้

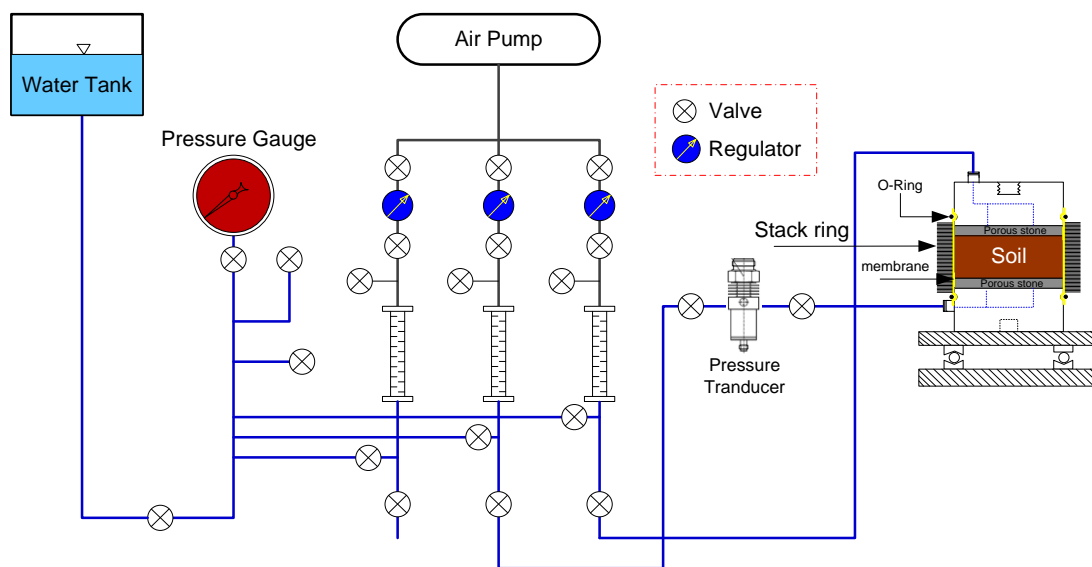
1) ทรานสดิวเซอร์ (Transducer) หรืออุปกรณ์แปลงข้อมูลหรือพลังงานรูปแบบต่าง ๆ ให้เป็นข้อมูลหรือพลังงานไฟฟ้า ประกอบด้วย

- โหลดเซลล์ (Load cell) ยี่ห้อ BONGSHIN รุ่น DBBP-500 ใช้สำหรับเป็นอุปกรณ์วัดค่าแรงกด ในการวัดค่าแรงกดในแนวตั้งจะได้แรงกดทับที่ตัวอย่างดินทดสอบและการวัดค่าแรงกดในแนวราบทำให้ได้ค่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในตัวอย่างดินทดสอบ

- ทรานสดิวเซอร์วัดการเคลื่อนที่ (Displacement transducer) หรือ LVDT รุ่น LSC Transducer SER No.HS50/8922 เป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้าที่ใช้วัดค่าการเคลื่อนที่ ในการทดสอบจะใช้

วัดค่าการเคลื่อนที่ในแนวตั้งได้ค่าการทรุดตัวของตัวอย่างดินทดสอบและวัดค่าการเคลื่อนที่ในแนวราบในขั้นตอนการเหนี่ยวนำตัวอย่างดิน

- ทรานสดิวเซอร์วัดความดัน (Pressure transducer) รุ่น PM2057 PM-001BRES30-E-ZVG/US//P เป็นอุปกรณ์ที่แปลงค่าความดันไปเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ใช้สำหรับการวัดค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นขณะทำการเหนี่ยวนำตัวอย่างดิน โดยทรานสดิวเซอร์วัดความดันนี้จะเชื่อมต่อระหว่างชุดสร้างแรงดันคงที่กับตัวอย่างดิน ดังแสดงในรูปที่ 3.14



รูปที่ 3.14 แผนภาพการติดตั้งระบบการตรวจวัดแรงดันน้ำ

2) อุปกรณ์เก็บบันทึก (Data logger) ยี่ห้อ KYOWA รุ่น PCD-300B คืออุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเก็บบันทึกข้อมูลที่เป็นสัญญาณชนิดต่างๆ โดยอุปกรณ์เก็บบันทึกจะมีหน่วยความจำสำหรับเก็บค่าที่วัดได้ของสัญญาณตามช่วงเวลาการบันทึกที่กำหนดไว้โดยอัตโนมัติ สามารถใช้เครื่องคอมพิวเตอร์ในการอ่านข้อมูลจากหน่วยความจำของอุปกรณ์เก็บบันทึกที่นำมาเสนอบนหน้าจอได้ โดยหลักการทำงานคืออุปกรณ์เก็บบันทึกจะรับค่าที่บันทึกจากตัวเซ็นเซอร์นำมาผ่านตัวแปลงสัญญาณ (Signal converter) เพื่อทำการแปลงสัญญาณที่รับมาจากสัญญาณอนาล็อกให้เป็นสัญญาณดิจิทัล

3) คอมพิวเตอร์และซอฟต์แวร์ DAS-100A เป็นอุปกรณ์ที่ได้จากการประมวลผลที่ส่งมาจาก อุปกรณ์เก็บบันทึก โดยซอฟต์แวร์มาพร้อมอุปกรณ์เก็บบันทึกของบริษัทผู้ผลิต

3.2 การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ (Index Properties)

การทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างดินจะใช้ดินเหนียวอ่อนปากพนัก ในการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของดิน ตัวอย่างดินที่เก็บมาได้ จะนำมาศึกษาคุณสมบัติพื้นฐาน ตามมาตรฐานของ ASTM (American Society for Testing and Materials) โดยการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานดังตารางที่ 3.1

ตารางที่ 3.1 แสดงการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดิน

การทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของดิน	มาตรฐานการทดสอบ
การทดสอบน้ำหนักรวมต่อหน่วยปริมาตร (Total Unit Weight)	ASTM D1156-90
การทดสอบหาค่าความชื้นในมวลดิน (Natural Moisture Content)	ASTM D2216-05
การทดลองหาค่าพิกต์เหลว (Liquid Limit)	ASTM D4318-93
การทดลองหาค่าพิกต์พลาสติก (Plastic Limit)	ASTM D4318-05
การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (Specific Gravity of Soil Solid)	ASTM D854-92

3.3 การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม (Engineering properties)

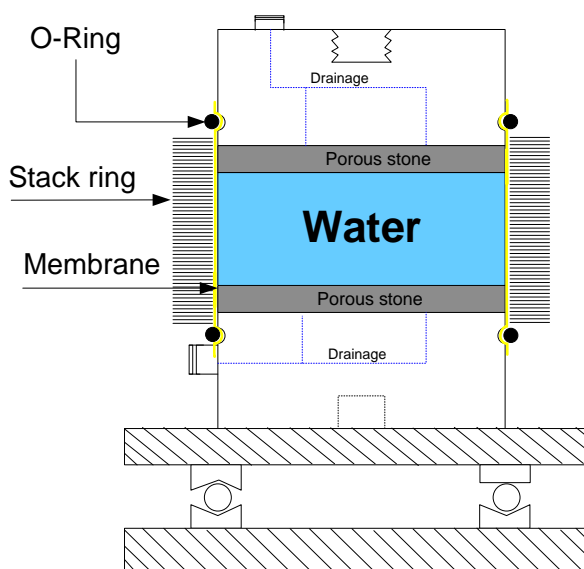
การทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของตัวอย่างดินเหนียว เป็นคุณสมบัติที่นำไปใช้ในการออกแบบโครงสร้างทางด้านวิศวกรรมปฐพี โดยการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรมของดินเหนียวปากพนักใช้วิธีการทดสอบและมาตรฐานดังต่อไปนี้

3.3.1 การทดสอบหาความเค้นประสิทธิผลสูงสุดในอดีต

การทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบหนึ่งมิติ อ้างอิงจากมาตรฐาน ASTM D 2435 เพื่อหาค่าความเค้นที่กดทับสูงสุดในอดีต (Maximum past pressure, σ'_{mp}) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงให้เห็นถึงค่าอัตราส่วนอัดแน่นเกินตัว (Overconsolidation ratio, OCR) ทั้งนี้ค่าหน่วยแรงกดสูงสุดในอดีต จะนำมาใช้เป็นค่าอ้างอิงในการอัดตัวคายน้ำในจากการทดสอบแรงเฉือนแบบตรงอย่างง่ายต่อไป

3.3.2 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของเมมเบรนและสแตคริงด้วยเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนแบบตรงอย่างง่าย

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของเมมเบรนและสแตคริงเป็นการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของเมมเบรนหุ้มตัวอย่างดินกับสแตคริงที่ใช้ในการควบคุมปริมาณตัวอย่างดินให้คงที่ ซึ่งผลการทดสอบที่ได้จะนำไปหักลบกับค่ากำลังรับแรงเฉือนของดิน ทำให้ได้ค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินที่แท้จริง การทดสอบจะจากการติดตั้งชุดอุปกรณ์การทดสอบไว้บนแท่นการทดสอบแล้วทำการใส่น้ำเข้าไปในเมมเบรนหุ้มตัวอย่างที่ล้อมรอบด้วยสแตคริงดังรูปที่ 3.15 ใส่น้ำให้เต็มแล้วทำการเลื่อนตัวอย่าง จะได้ค่ากำลังรับแรงเฉือนของเมมเบรนและสแตคริงเนื่องจากน้ำรับแรงเฉือนไม่ได้



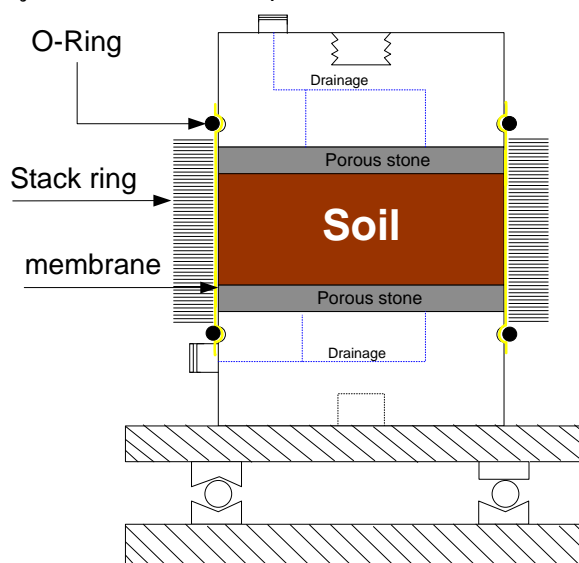
รูปที่ 3.15 ภาพจำลองการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของเมมเบรนและสแตคริง

3.3.3 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินด้วยเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนแบบตรงอย่างง่าย

การทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายสำหรับตัวอย่างทดสอบชนิดที่มีความเชื่อมั่นแน่นสามารถทำการทดสอบได้ตามมาตรฐานของ ASTM D 6525-00 ดังขั้นตอนต่อไปนี้

3.3.3.1 การเตรียมตัวอย่างที่จะใช้ในการทดสอบ

การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ ตัวอย่างดินที่ใช้ในการทดสอบนี้จะใช้ตัวอย่างดินเหนียวปากผนังซึ่งเป็นดินเหนียวอ่อนที่ได้จากการเก็บมาจากหลุมเจาะบริเวณอำเภopakผนัง ทำการเตรียมตัวอย่างตามขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างดังตารางที่ 3.2 ใช้เมนเบรนหุ้มตัวอย่างดินแล้วใช้สแตคริงซึ่งเป็นสแตนเลสแผ่นบางๆเจาะรูตรงกลางขนาดเท่ากับเส้นผ่านศูนย์กลางของตัวอย่างดินวางซ้อนกัน ดังรูปที่ 3.16 ในการควบคุมปริมาตรตัวอย่างดินระหว่างทดสอบ




รูปที่ 3.16 ภาพจำลองตัวอย่างที่เตรียมดินที่พร้อมทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินด้วยเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนแบบตรงอย่างง่าย

ตารางที่ 3.2 วิธีการเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ลำดับขั้นตอน	รูปภาพประกอบ
1) เริ่มจากการชั่งน้ำหนักแผ่นอะคริลิกแล้วนำตัวอย่างดินเหนียวมาวางบนแผ่นอะคริลิกยูเท่นทดสอบ	
2) นำอุปกรณ์ตัดดิน สวมเข้าเสาของแท่นเตรียมตัวอย่าง แล้วทำการกดลงบนตัวอย่าง	
3) ตัวอย่างดินที่สั้นจากขอบบนของอุปกรณ์ตัดดินใช้ลวดตัดดินส่วนที่สั้นออก	




ตารางที่ 3.2 วิธีการเตรียมตัวอย่างทดสอบ(ต่อ)

ลำดับขั้นตอน	รูปภาพประกอบ
4) นำท่อสแตนเลสกลวงสวมบนอุปกรณ์ตัดดิน ภายหลังจากตัดดินส่วนสั้นออกแล้วมาสวม	
5) นำอุปกรณ์ตัดดินที่มีตัวอย่างดินด้านในออก จากแท่นเตรียมตัวอย่างแล้วทำการกลับหัว อุปกรณ์ตัดดินแล้วสวมเข้าเสาของแท่นทดสอบ	
6) แล้วทำการตัดดินตัวอย่างที่สัมผัสจากขอบบน ของอุปกรณ์ตัดดิน	
7) นำอุปกรณ์ตัดดินสวมเข้ากับเสาของแท่น เตรียมตัวอย่างแล้วทำการดันตัวอย่างดินที่อยู่ใน อุปกรณ์ตัดดินออก	
8) เมื่อดันตัวอย่างดินออกแล้ว ทำการถอด อุปกรณ์ตัดดินและอุปกรณ์ตัดดินออก	
9) นำตัวอย่างดิน ไปชั่งน้ำหนัก บันทึกค่า น้ำหนักเปียกของตัวอย่างทดสอบ แล้วทำการวัด เส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของตัวอย่าง ซึ่ง โดยปกติขนาดของตัวอย่างจะเท่ากับขนาดของ อุปกรณ์ตัดดิน	

ตารางที่ 3.2 วิธีการเตรียมตัวอย่างทดสอบ(ต่อ)

ลำดับขั้นตอน	รูปภาพประกอบ
<p>10) หลังจากชั่งน้ำหนัก วัดขนาดของตัวอย่าง แล้ว ทำการติดตั้งกระดวยกรองและหินพรุน โดยที่ตัวอย่างดินกระดวยกรองวางบนหินพรุน ที่มีฐานล่างรองรับ(Bottom)</p>	
<p>11) นำยางหุ้มตัวอย่างสวมเข้ากับอุปกรณ์สวมยางหุ้มตัวอย่าง ดูดอากาศภายในของอุปกรณ์สวมยางออกเพื่อให้ยางแนบสนิท แล้วใช้ O-ring รััดหัวและท้ายของอุปกรณ์สวมยาง</p>	
<p>12) นำอุปกรณ์สวมยางหุ้มตัวอย่างสวมเข้าแทนเตรียมตัวอย่างแล้วทำคลียางมาหุ้มตัวอย่าง โดยทำการคลีส่วนล่างก่อนแล้วใช้ O-ring รััด ส่วนด้านบนนำฝาบน(Top cap) มาวางบนตัวอย่าง ดินแล้วทำการคลียางส่วนบนแล้ว</p>	
<p>13) นำอุปกรณ์สวมยางหุ้มตัวอย่างออกจากแท่นเตรียมตัวอย่าง</p>	

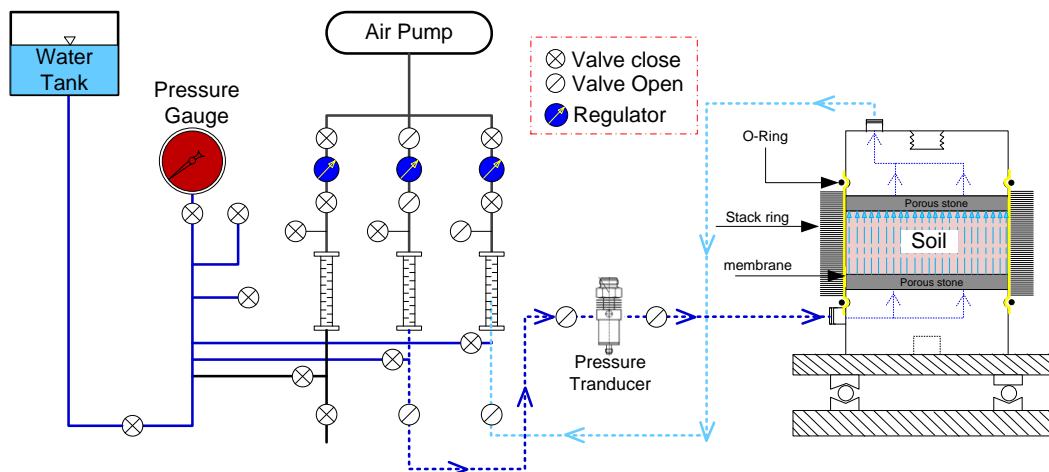
ตารางที่ 3.2 วิธีการเตรียมตัวอย่างทดสอบ(ต่อ)

<p>14) นำสแตคริงมาครอบตัวอย่างดินที่มียางหุ้มตัวอย่างแล้วใช้ O-ring รััดฝาบน(Top cap) ของตัวอย่าง</p>	
<p>16) นำอุปกรณ์ดันดินสวมเข้าแทนเตรียมตัวอย่างแล้วต่อกับฝาบน (Top cap) โดยเกลียวเพื่อไม่ให้ตัวอย่างดินเกิดการรบกวน ขณะขันเกลียวข้อต่อระบายน้ำ</p>	
<p>17) นำตัวอย่างดินที่ถูกเตรียมไว้แล้วนำมาวางบนแท่นทดสอบของเครื่องทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่าย</p>	

3.3.3.2 การทำให้ตัวอย่างดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturation)

การทำให้ตัวอย่างดินอิ่มตัวด้วยน้ำเริ่มจากนำตัวอย่างดินที่เตรียมเสร็จแล้วนำขึ้นไปวางบนแท่นทดสอบของเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนแบบตรงอย่างง่าย ทำการติดตั้งระบบวัดแรงดันน้ำ ใส่ น้ำหนักกดทับแนวตั้งเท่ากับ 5 kPa เพื่อไม่ให้ตัวอย่างดินเกิดการบวมตัวขึ้นทางตั้ง แล้วทำการใส่แรงดันน้ำเข้าไปยังตัวอย่างดินทางรูระบายน้ำด้านล่าง (Bottom) ให้แรงดันน้ำวิ่งเข้า

ไปในตัวอย่างดินแล้วระบายออกทางรูระบายน้ำด้านบน (Top Cap) ของตัวอย่างดิน ดังรูปที่ 3.17 และรูปที่ 3.18 เป็นการไล่อากาศของจากมวลดิน หลังจากนั้นทิ้งไว้แบบนี้ประมาณ 5 ชั่วโมง จนเชื่อได้ว่าตัวอย่างดินอิ่มตัวด้วยน้ำแล้วจึงปิดวาล์วแรงดันน้ำ



รูปที่ 3.17 ภาพจำลองการทำให้ตัวอย่างดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturation)

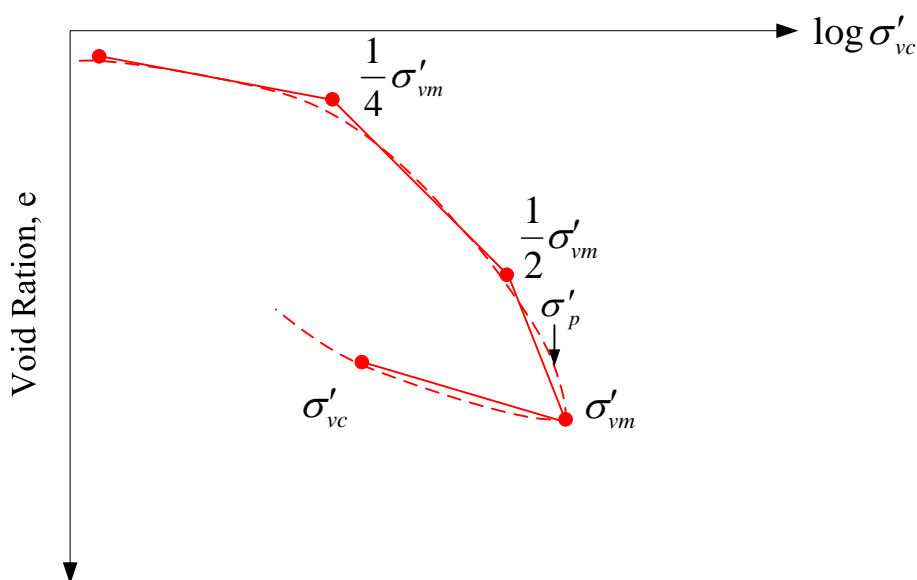


รูปที่ 3.18 ขั้นตอนการทำให้ตัวอย่างดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturation)

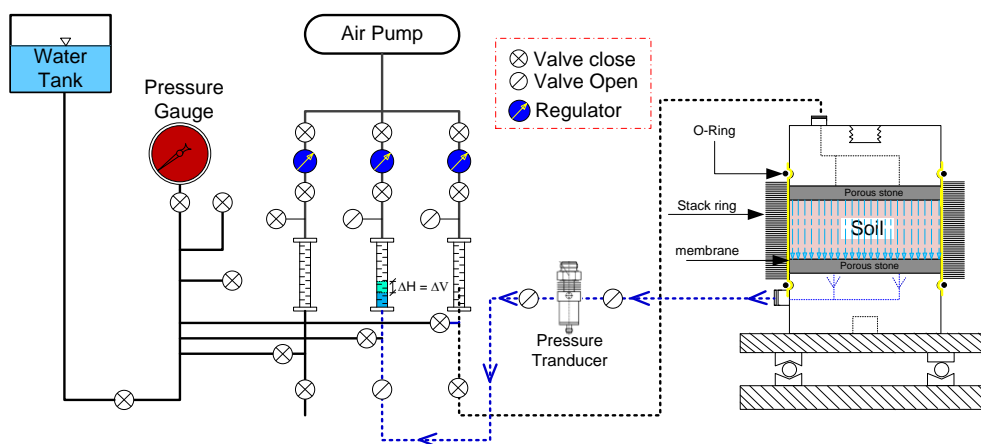
3.3.3.3 การอัดตัวคายน้ำ (Consolidation)

ตัวอย่างดินทดสอบอิมตัวด้วยน้ำแล้ว จะทำให้โพรงของตัวอย่างดินเต็มไปด้วยน้ำ การอัดตัวคายน้ำของตัวอย่างทดสอบจะเพิ่มความเค้นในแนวตั้ง (σ'_{vc}) เป็นลำดับขั้น โดยมีอัตราส่วนค่า LIR=1 (Load increment ratio) จนกระทั่งมีค่าเท่ากับความเค้นสูงสุด (σ'_{vm}) ที่มีค่ามากกว่า (σ'_p) จากการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบ 1 มิติ ในแต่ละลำดับขั้นของความเค้นจะใช้เวลาประมาณ 24 ชั่วโมง หรือจนกว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำส่วนเกิน ดังรูปที่ 3.19 จากระบบขั้นตอนการทำให้ตัวอย่างดินอิมตัวด้วยน้ำกระบวนการอัดตัวคายน้ำกระทำโดยการใส่น้ำหนักกดแนวตั้งแล้วทำการปิดวาล์วระบายน้ำด้านบนเพื่อให้มีการระบายน้ำทางเดียว ดังรูปที่ 3.20

การอัดตัวคายน้ำของตัวอย่างทดสอบที่การอัดตัวแน่นปกติจะกระทำโดยเพิ่มความเค้นในแนวตั้ง (σ'_{vc}) จนกระทั่งมีค่าเท่ากับความเค้นสูงสุด (σ'_{vm}) ที่ต้องการ การอัดตัวคายน้ำของตัวอย่างทดสอบที่การอัดตัวแน่นเกินตัวจะกระทำโดยเพิ่มความเค้นในแนวตั้ง (σ'_{vc}) จนกระทั่งมีค่าเท่ากับความเค้นสูงสุด (σ'_{vm}) ที่ต้องการจากนั้นจะลดค่าความเค้นในแนวตั้ง (σ'_{vc}) จนถึงระดับค่าอัตราส่วนการอัดตัวแน่นเกินตัวตามต้องการ



รูปที่ 3.19 แสดงการจำลองการเพิ่มความเค้นในแนวตั้ง (σ'_{vc}) ของการทดสอบการอัดตัวคายน้ำของตัวอย่างทดสอบ



รูปที่ 3.20 ภาพจำลองระบบการอัดตัวคายน้ำของตัวอย่างทดสอบ

3.3.2.4 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบตรงอย่างง่ายแบบทางเดียว

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบตรงอย่างง่ายแบบทางเดียวโดยเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนแบบตรงอย่างง่าย ทำการทดสอบแบบไม่ระบายน้ำด้วยอัตราเร็วของแรงเฉือน ($\dot{\gamma}$) เท่ากับ 5 % ต่อชั่วโมง ทำการบังคับห้ามเคลื่อนที่ในแนวตั้งแล้วติดตั้งอุปกรณ์วัดแรงดันน้ำ ดังรูปที่ 3.13 ระหว่างทำการเฉือนทำการบันทึกค่าความเค้นสูงสุดในแนวตั้ง ค่าแรงดันน้ำที่เกิดขึ้นระหว่างการเฉือนตัวอย่างดิน ค่าความเค้นในแนวราบและการเคลื่อนตัวในแนวราบ

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบทางเดียวสามารถสรุปลำดับของการทดสอบได้ดังตารางที่ 3.3

ตารางที่ 3.3 แสดงตัวอย่างการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบทางเดียว

ตัวอย่างทดสอบ	อัตราส่วนการอัดตัวแน่นเกินตัว (OCR)	Maximum Stress σ'_{vm} (kPa)	Vertical Stress σ'_{vo} (kPa)
NC 85	1	85	85
NC 124	1	124	124
NC 238	1	238	238
OC 2	2	250	125
OC 4	4	250	63
OC 8	8	250	31

3.4 การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องมืออุปกรณ์การทดสอบการเฉือนแบบตรง

การทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องมืออุปกรณ์การทดสอบการเฉือนแบบตรงที่ได้ออกแบบพัฒนาขึ้นมา เป็นสิ่งสำคัญในการสร้างความน่าเชื่อถือให้แก่เครื่องทดสอบ ซึ่งผลการทดสอบตามตารางที่ 3.3 นำมาเปรียบเทียบผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained shear strength) โดยวิธีการทดสอบแรงอัดสามแกนของศิริพร (2556) เนื่องจากได้ใช้ตัวอย่างดินและหลุมเจาะเดียวกันดังนั้นผลการทดสอบควรมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันที่ทำให้สามารถเชื่อได้ว่าเครื่องทดสอบที่ได้พัฒนาขึ้นมาสามารถทำการทดสอบได้จริง

การเปรียบเทียบผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำจะแสดงผลเปรียบเทียบในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนที่ทำการบรรทัดฐานด้วยค่าความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ยกับค่าอัตราความเครียดของผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ ที่อัตราการอัดแน่นเกินตัวที่ 1, 2, 4 และ 8

3.5 ประมาณกำลังรับแรงเฉือนทางเดียวอย่างง่ายแบบไม่ระบายน้ำด้วยวิธี SHANSEP (Stress History and Normalized Soil Engineering Properties)

การทดสอบแบบทางเดียวจะนำค่าแรงเฉือนสูงสุดที่วัดได้ ที่การอัดตัวแน่นเกินตัวแตกต่างกัน และนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ในการประมาณค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำตามวิธี SHANSEP ดังสมการที่ 3.1

$$\frac{S_{u(Dss)}}{\sigma'_{vc}} = s(OCR)^m \quad (3.1)$$

เมื่อ

S_u คือ Undrained Shear Strength ($\phi = 0$)

σ'_{vc} คือ Effective Overburden Pressure

s คือ Strength Ratio

OCR คือ Overconsolidation Ratio

m คือ 0.7-0.9 Ladd (1977)

บทที่ 4

ผลการศึกษาและการวิเคราะห์ผลการศึกษา

4.1 ผลการออกแบบเครื่องมืออุปกรณ์การทดสอบการเลื่อนแบบตรงอย่างง่าย

4.1.1 ผลการออกแบบชุดอุปกรณ์การเตรียมตัวอย่าง

การออกแบบชุดอุปกรณ์การเตรียมตัวอย่างสามารถเตรียมตัวอย่างดินคงสภาพได้ โดยไม่ให้ถูกรบกวนก่อนการทดสอบ จากการศึกษาและรวบรวมข้อมูลตลอดจนศึกษากรรมวิธีการเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบการเลื่อนแบบตรงอย่างง่าย ได้สร้างชุดอุปกรณ์การเตรียมตัวอย่างที่สามารถเตรียมตัวอย่างดินได้ไม่แตกต่างจากอุปกรณ์ที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ โดยชุดอุปกรณ์การเตรียมตัวอย่างประกอบด้วย แท่นเตรียมตัวอย่าง อุปกรณ์ตัดตัวอย่าง อุปกรณ์ดันตัวอย่างออกจากชุดตัดดิน อุปกรณ์สวมเมนเบรนหุ้มตัวอย่าง

อุปกรณ์ที่เตรียมตัวอย่างถูกออกแบบมาเพื่อสามารถเตรียมตัวอย่างคงสภาพได้ทั้ง ดินเหนียว(Clay) ทราย (Sand) และดินตะกอน (Silt) วัสดุของชุดอุปกรณ์ทำมาจากเหล็กและสแตนเลส ที่มีความแข็งแรง คงทน ตัวอย่างหลังจากเตรียมมีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 72.50 มิลลิเมตร สูง 28.00 มิลลิเมตร หุ้มด้วยเมมเบรน (Membrane) และสแตคริง (Stack Rings) หลังจากเตรียมตัวอย่างเสร็จให้นำตัวอย่างขึ้นติดตั้งบนแท่นพร้อมสำหรับทดสอบทดสอบการเลื่อนแบบตรงอย่างง่าย ดังแสดงในรูปที่ 4.1



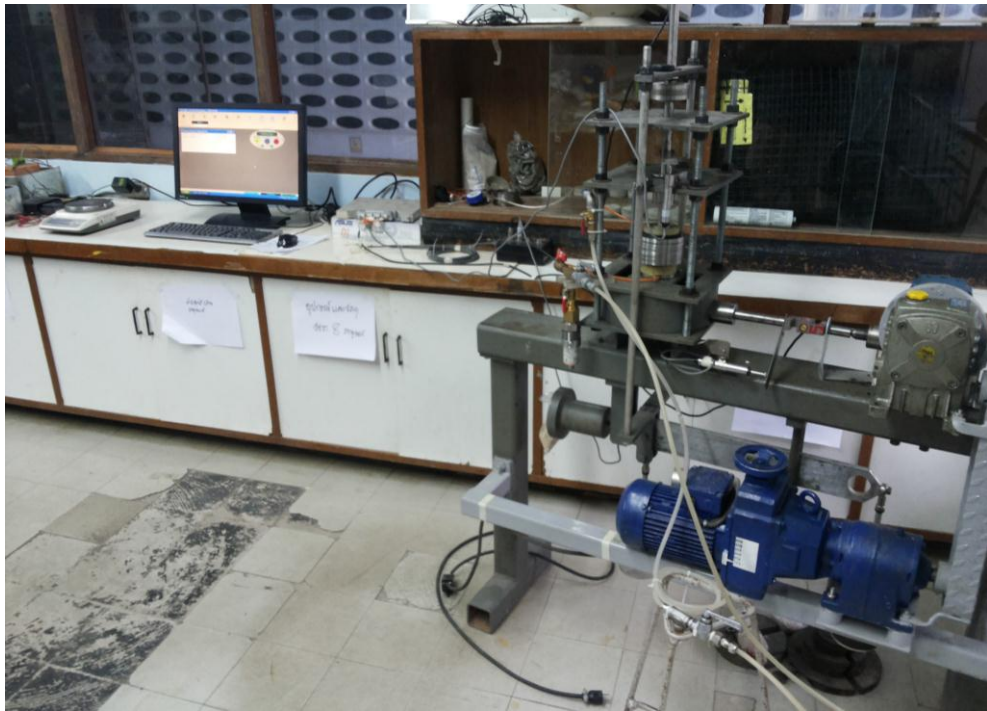
รูปที่ 4.1 แสดงตัวอย่างที่เตรียมวางบนแท่นทดสอบการเหือนแบบตรงอย่างง่าย

4.1.2 ผลการออกแบบเครื่องทดสอบการเหือนแบบตรงอย่างง่าย (Direct Simple Shear Apparatus)

เครื่องทดสอบการเหือนแบบตรงอย่างง่าย ที่ออกแบบได้ใช้หลักการคานงัดในอัตรา 1 : 11 ในการให้น้ำหนักกดตัวอย่างแนวตั้ง ทำจากอลูมิเนียมที่มีน้ำหนักเบาและมีลูกตุ้มเหล็กในการสมดุลน้ำหนักก่อนใส่น้ำหนักกด ในส่วนการเหือนตัวอย่างดิน จะใช้มอเตอร์ที่สามารถปรับความเร็วรอบต่ำ ใช้มอเตอร์เกียร์ ขนาด 2 แรงมีอัตราทดรอบ 1 : 30 ต่อเข้ากับชุดเกียร์ทดรอบ (Worm gear) ที่มีอัตราทดรอบ 1:50 และ 1: 20 สามารถทำการเหือนตัวอย่างดินด้วยอัตราการเหือน ตั้งแต่ 0.020 – 1.00 มิลลิเมตรต่อนาที ใช้โพลลเซลล์สำหรับเป็นอุปกรณ์วัดค่าแรงกด 2 ชุด ในการวัดค่าแรงกดในแนวตั้งและแนวราบ ใช้ทรานสดิวเซอร์วัดการเคลื่อนที่หรือ LVDT เป็นอุปกรณ์การวัดค่าการเคลื่อนที่ในแนวตั้งและแนวราบและใช้ทรานสดิวเซอร์วัดแรงดันเป็นอุปกรณ์วัดค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นเชื่อมต่อกับชุดสร้างแรงดันคงที่ ดังรูปที่ 4.2 ข้อมูลทั้งหมดถูกเก็บข้อมูลด้วยระบบคอมพิวเตอร์ ดังรูปที่ 4.3 และ 4.4



รูปที่ 4.2 แสดงชุดอุปกรณ์การสร้างแรงดันคงที่



รูปที่ 4.3 แสดงการติดตั้งระบบสำหรับทดสอบการไหลแบบตรงอย่างง่าย



รูปที่ 4.4 การติดตั้งอุปกรณ์การวัดแรงดันน้ำในมวลดินสำหรับทดสอบการเหือนแบบตรงอย่างง่าย

4.2 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพ (Index Properties)

การทดสอบคุณสมบัติขั้นพื้นฐานโดยนำตัวอย่างดินมาทำการทดสอบ ดังต่อไปนี้ การทดสอบหาน้ำหนักรวมต่อหน่วยปริมาตร การทดสอบหาค่าความชื้นในมวลดิน การทดสอบหาค่าพิกัดเหลว การทดสอบหาค่าพิกัดพลาสติก การทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน ตัวอย่างดินที่นำมาทดสอบเป็นดินเหนียวปากผนังเป็นดินที่เกิดจากการตกตะกอนและทับถมบริเวณชายฝั่งทะเล (Marine deposits) โดยมีต้นกำเนิดมาจากเทือกเขาหลวง ลักษณะดินมีสีเทาเนื้อค่อนข้างละเอียดอนุภาคเม็ดดินมีลักษณะแบนและเล็ก ค่าคุณสมบัติต่างๆสามารถสรุปไว้ในตารางที่ 4.1

ตารางที่ 4.1 ค่าคุณสมบัติทางวิศวกรรมเบื้องต้นของตัวอย่างทดสอบ

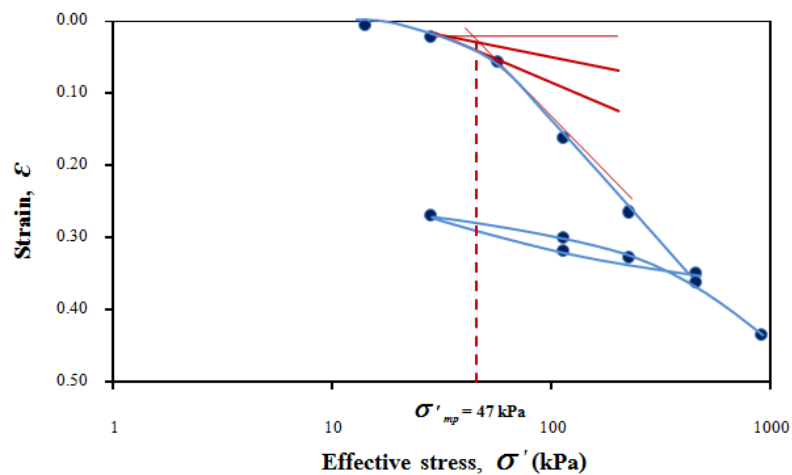
คุณสมบัติ		ค่า
ค่าความชื้นในธรรมชาติ (w_n)	%	80.67
ค่าพิกัดเหลว (LL)	%	64.90
ค่าพิกัดพลาสติก (PL)	%	29.90
ค่าดัชนีพลาสติก (PI)	%	34.90
ค่าหน่วยน้ำหนัก (γ_t)	ton/m ³	1.51
ค่าความถ่วงจำเพาะ (G_s)	-	2.67

จากผลการทดสอบตัวอย่างดินด้านคุณสมบัติขั้นพื้นฐานของดินเหนียวในธรรมชาติพบว่าตัวอย่างดินมีค่าความชื้นในมวลดิน (Water content, w_n) ประมาณร้อยละ 80.67 ทำการทดสอบพิกัดลิมิตเตอร์เบอร์รี่ได้ค่าขีดพิกัดเหลว (Liquid Limit, LL) ประมาณร้อยละ 64.90 ค่าขีดพิกัดพลาสติก (Plastic limit, PL) ประมาณร้อยละ 29.90 จากนั้นซึ่งเมื่อนำไปหาค่าดัชนีพลาสติก (Plastic index, PI) ได้ค่าประมาณร้อยละ 34.90 ซึ่งจากผลการทดสอบจะเห็นได้ว่าดินเหนียวปากผนังมีค่าความชื้นในธรรมชาติสูงกว่าค่าพิกัดเหลว และมีค่าดัชนีเหลวสูงกว่า 1 ทำให้เป็นดินเหนียวที่มีค่าความไวตัวสูง สำหรับความถ่วงจำเพาะของเม็ดดิน (Specific gravity of soil solid, G_s) มีค่าประมาณ 2.67 หน่วยน้ำหนักรวม (Total unit weight, γ_t) มีค่าประมาณ 1.51 ตันต่อลูกบาศก์เมตร

4.3 ผลการทดสอบคุณสมบัติทางวิศวกรรม (Engineering properties)

4.3.1 ผลการทดสอบหาความเค้นประสิทธิผลสูงสุดในอดีต

การทดสอบการอัดตัวคายน้ำทำการทดสอบด้วยเครื่องมือทดสอบอัดตัวคายน้ำแบบ 1 มิติ ด้วยค่าความเค้นประสิทธิผลเท่ากับ 1/8 1/4 1/2 1 2 4 และ 8 เท่าของแรงกดทับในธรรมชาติ (Overburden Pressure, σ'_{vo}) และลดค่าความเค้นประสิทธิผลเท่ากับ 2 และ 0.5 เท่าของแรงกดทับในธรรมชาติในขั้นตอนการคืนตัว ผลที่ได้จากการทดสอบนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเครียด (ε) ต่อล็อกของความเค้นประสิทธิผล ($\log \sigma'_{vc}$) เพื่อสร้างเส้นโค้งการยุบตัวและหาค่าความเค้นประสิทธิผลที่เคยกระทำในอดีต ดังรูปที่ 4.5



รูปที่ 4.5 เส้นโค้งการอัดตัวคายน้ำของตัวอย่างดินเหนียวปากพนัง ความลึก 7 – 7.5 เมตร

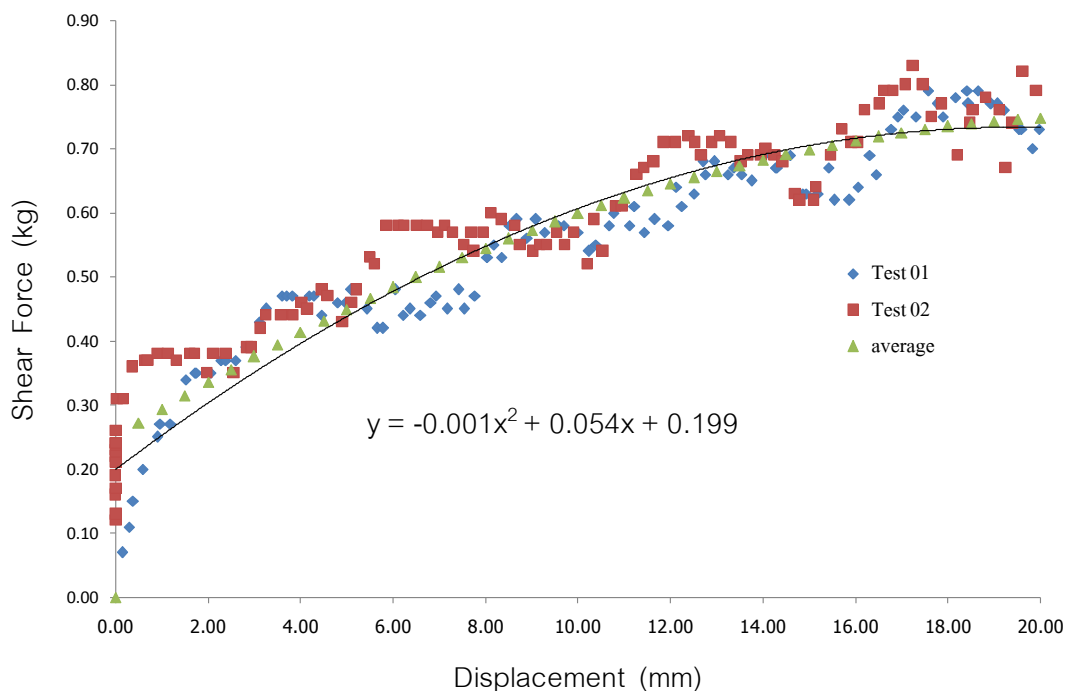
จากผลการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบ 1 มิติสามารถทราบค่าความเค้นกดทับสูงสุดในอดีต (Stress History, σ'_{mp}) มีค่าเท่ากับ 47 kPa ซึ่งจะนำค่านี้ไปกำหนดค่านี้ในการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่าย และคำนวณอัตราส่วนการอัดตัวแน่นเกินตัวในธรรมชาติได้เท่ากับ 0.931

4.3.2 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของเมนเบรนและสแตคริ่งด้วยเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนแบบตรงอย่างง่าย

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของเมนเบรนและสแตคริ่งเป็นการทดสอบหาค่ากำลังรับแรงเฉือนของเมนเบรนหุ้มตัวอย่างดินกับสแตคริ่ง ทดสอบโดยใส่น้ำไปแทนที่ตัวอย่างดินแล้วทำการเฉือนน้ำที่หุ้มด้วยเมนเบรนและสแตคริ่งดังรูปที่ 4.6 จากการทดสอบพบว่า ค่ากำลังรับแรงเฉือนของเมนเบรนและสแตคริ่งมีพฤติกรรมการรับแรงจะเพิ่มขึ้นแปรผันตามระยะการเคลื่อนที่ดังแสดงในรูปที่ 4.7 ค่ากำลังรับแรงเฉือนต่อระยะการเคลื่อนที่จะแสดงในรูปสมการ นำสมการที่ได้ไปหักลบกับค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินจากการทดสอบแรงเฉือนแบบตรงอย่างง่าย ค่าที่ได้จะเป็นค่ากำลังรับแรงเฉือนของดินที่แท้จริง



รูปที่ 4.6 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของเมนเบรนและสแตคริง



รูปที่ 4.7 ผลการทดสอบการเนียนแบบตรงอย่างง่ายของเมนเบรนและสแตคริง

จากผลการทดสอบกำลังรับแรงเนียนของเมนเบรนและสแตคริง ดังรูปที่ 4.7 แสดงกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะของการเคลื่อนตัวกับแรงเนียน จากผลการทดสอบพบว่าอัตราส่วนระยะการเคลื่อนตัวกับแรงเนียนจะมีความชันมากในช่วง 0 – 2 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นผลมาจากความฝืดของแผ่นสแตคริงและจะค่อยๆ ลดลงอย่างสม่ำเสมอ ทดสอบจนถึงระยะเคลื่อนตัวเท่ากับ 20 มิลลิเมตร จากกราฟจะได้เส้นแนวโน้มและสมการของเส้นแนวโน้มเพื่อใช้ในการหาค่าความฝืดระหว่างเมนเบรนและสแตคริง และเมื่อทำการทดสอบกำลังรับแรงเนียนแบบตรงอย่างง่ายของตัวอย่างดินจากเครื่องที่พัฒนาขึ้นมา ทำให้ได้ค่ากำลังรับแรงเนียนของตัวอย่างดินที่แท้จริง

4.3.3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงเนียนของดินด้วยเครื่องมือทดสอบแรงเนียนแบบตรงอย่างง่าย

การทดสอบกำลังรับแรงเนียนทำการทดสอบด้วยเครื่องมือทดสอบแรงเนียนทางตรงอย่างง่ายแบบทางเดียว โดยทำการทดสอบจะทำการวัดค่ากำลังรับแรงเนียนทางตรงอย่างง่ายแบบไม่ระบายน้ำที่อัตราส่วนการอัดแน่นเกินกว่าปกติที่แตกต่างกัน โดยทำการทดสอบที่ระดับการอัดตัวแน่นเกินตัวที่แตกต่างกัน คือ ทำการทดสอบการอัดตัวแน่นเกินตัวเท่ากับ 1 2 4 และ 8

ตามลำดับ สำหรับการเตรียมตัวอย่างด้วยการอัดตัวคายน้ำด้วยเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่าย เพื่อแน่ใจว่าการเตรียมตัวอย่างอยู่ในสภาพตามที่ต้องการ ทั้งการเตรียมตัวอย่างแบบการอัดตัวแน่นปกติ และการเตรียมตัวอย่างแบบการอัดตัวแน่นเกิน การทดสอบแรงเฉือนจะวัดค่าความเค้นเฉือนสูงสุด ความเครียดเฉือนและแรงดันน้ำส่วนเกิน สำหรับผลการทดสอบของตัวอย่างทดสอบที่อัตราส่วนการอัดตัวแน่นปกติจะแสดงดังรูปที่ 4.8 และผลการทดสอบแบบ Normalized ดังรูปที่ 4.9 โดยมีรายละเอียดดังนี้

-รูปที่ 4.8 (a) ผลกระทบของความเค้นเฉือน (τ') ต่อการเปลี่ยนแปลงของความเครียดเฉือน (γ)

-รูปที่ 4.8 (b) กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันน้ำส่วนเกิน (Δu) ในตัวอย่างทดสอบที่มีผลมาจากการเพิ่มขึ้นของความเครียดเฉือน

-รูปที่ 4.9 (a) ผลกระทบของความเค้นเฉือนต่อการเปลี่ยนแปลงของความเครียดเฉือน โดยที่ความเค้นเฉือนซึ่ง Normalized ด้วย σ'_{vc} (τ'/σ'_{vc})

-รูปที่ 4.9 (b) ผลของแรงดันน้ำส่วนเกินขณะกระทำแรงเฉือนที่มีความสัมพันธ์กับความเครียดเฉือน โดยการ Normalized Δu ด้วย σ'_{vc} ($\Delta u/\sigma'_{vc}$)

การทดสอบที่อัตราส่วนการอัดตัวแน่นเกินตัวผลการทดสอบจะแสดงดังรูปที่ 4.10 และผลการทดสอบแบบ Normalized ดังรูปที่ 4.11 โดยมีรายละเอียดดังนี้

-รูปที่ 4.10 (a) ผลกระทบของความเค้นเฉือน (τ') ต่อการเปลี่ยนแปลงของความเครียดเฉือน (γ)

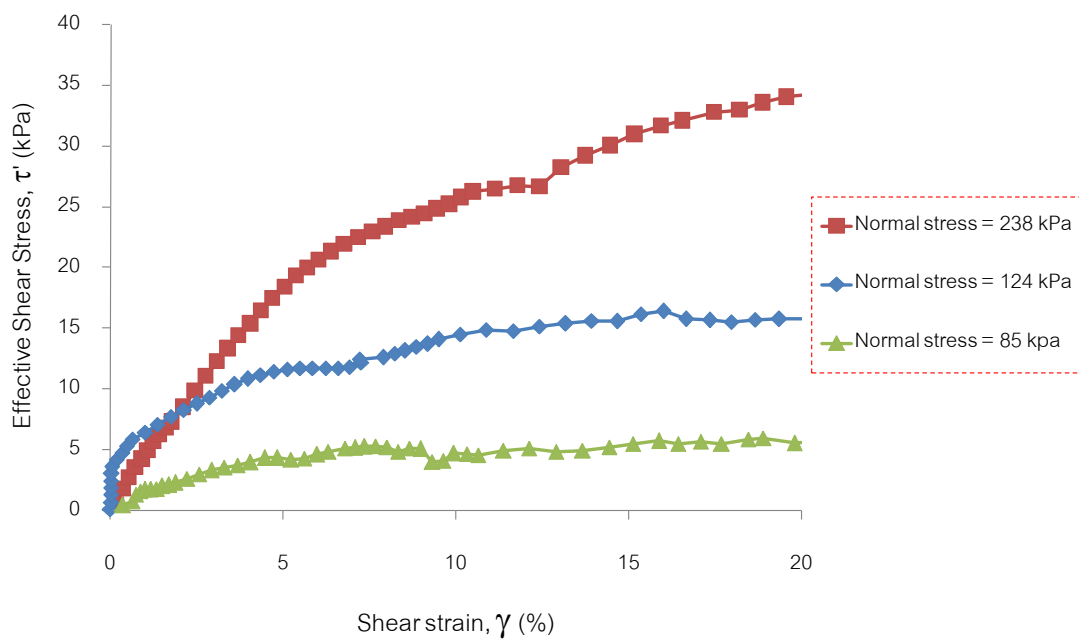
-รูปที่ 4.10 (b) กราฟความสัมพันธ์ของแรงดันน้ำส่วนเกิน (Δu) ในตัวอย่างทดสอบที่มีผลมาจากการเพิ่มขึ้นของความเครียดเฉือน (γ)

-รูปที่ 4.11 (a) ผลกระทบของความเค้นเฉือนต่อการเปลี่ยนแปลงของความเครียดเฉือนโดยที่ค่าความเค้นเฉือนจะซึ่ง Normalized ด้วย σ'_{vc} (τ'/σ'_{vc})

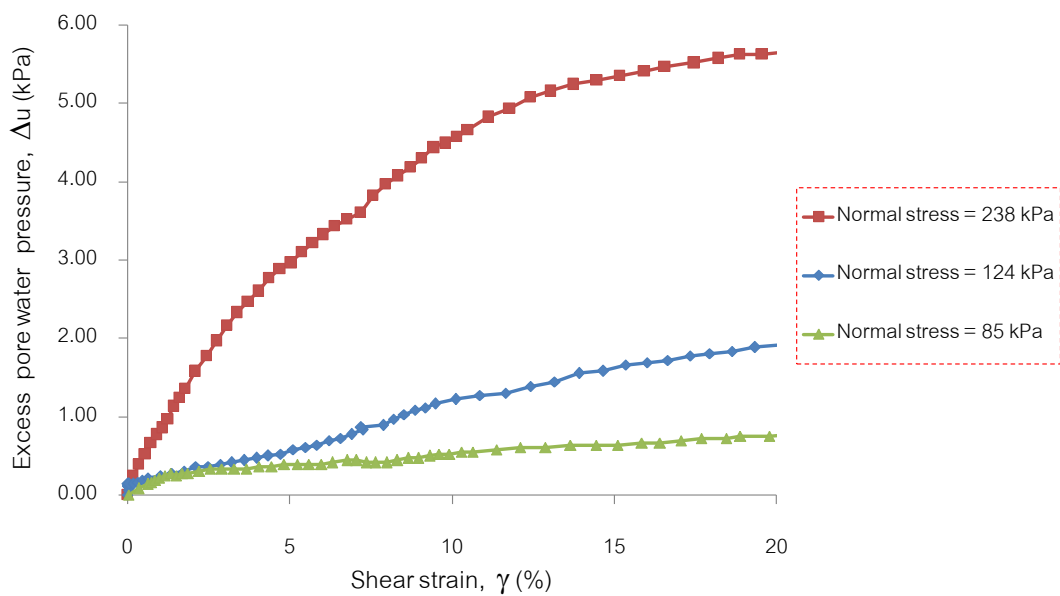
-รูปที่ 4.11 (b) ผลของของแรงดันน้ำส่วนเกินขณะกระทำแรงเฉือนที่มีความสัมพันธ์กับความเครียดเฉือน โคนทำการ Normalized Δu ด้วย ($\Delta u/\sigma'_{vc}$)

จากการทดสอบแรงเฉือนแบบตรงอย่างง่ายของตัวอย่างทดสอบที่อัตราส่วนการอัดตัวแน่นปกติที่อัตราความเครียดเฉือน 0.075 เปอร์เซนต์ต่ออนาที โดยการเปลี่ยนแปลงความเค้นประสิทธิผลแนวตั้ง 238 124 และ 85 kPa จากรูปที่ 4.8 (a) พบว่าเมื่อทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราความเครียดเฉือนกับความเค้นเฉือนประสิทธิผล ค่าความเค้นเฉือนประสิทธิผลจะเพิ่มขึ้นตามการเปลี่ยนแปลงความเค้นประสิทธิผลแนวตั้งที่เพิ่มขึ้น ส่วนค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นขณะทำการเฉือนตัวอย่าง สามารถแสดงในรูปที่ 4.8(b) จากรูป พบว่า ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินจะค่อยๆเพิ่มขึ้นตามความเค้นประสิทธิผลแนวตั้งที่เพิ่มขึ้น ซึ่งขณะทำการเฉือนความสูงของตัวอย่างถูกบังคับไม่ให้มีการเปลี่ยนแปลง แรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นจะเท่ากับค่าความเค้นประสิทธิผลแนวตั้งที่เกิดขึ้นในตัวอย่าง จากผลการทดสอบข้างต้นผลของการทดสอบที่ได้จากเครื่องทดสอบแรงเฉือนแบบตรงอย่างง่ายที่พัฒนาขึ้นมา แนวโน้มของผลการทดสอบเป็นไปตามทฤษฎี แต่ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่อ่านค่าได้ยังน้อยกว่าความเป็นจริง

เมื่อนำผลการทดสอบมาทำบรรทัดฐาน(Normalized) เพื่อให้สามารถเห็นความชัดเจนของกราฟความสัมพันธ์มากยิ่งขึ้น โดยสามารถสรุปได้ดังนี้ ความเค้นประสิทธิผลแนวตั้งจะลดลงเมื่อความเค้นเฉือนประสิทธิผลเพิ่มขึ้น ซึ่งเกิดจากผลของแรงดันน้ำส่วนเกินเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ความเค้นประสิทธิผลแนวตั้งจะค่อยๆลดลง ค่าความเค้นเฉือนประสิทธิผลจะเพิ่มขึ้นตามค่าความเครียดเฉือนที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 4.9(a) ทำการบรรทัดฐานแรงดันน้ำส่วนเกินกับความเค้นประสิทธิผลแนวตั้ง ทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแรงดันน้ำส่วนเกินกับการเปลี่ยนแปลงความเครียดเฉือน ดังรูปที่ 4.9(b) จากรูปพบว่าค่าแรงดันน้ำส่วนเกินของความเค้นประสิทธิผลแนวตั้งที่ 238 kPa พบว่าแนวโน้มของกราฟไม่ซ้อนทับกับความเค้นประสิทธิผลแนวตั้งที่ 124 และ 85 ซึ่งตามพฤติกรรมของดินตามทฤษฎีเมื่อทำการบรรทัดฐานจะต้องซ้อนทับเป็นเส้นเดียว จากที่กราฟไม่เป็นไปตามทฤษฎีซึ่งเป็นผลที่สนับสนุนความผิดพลาดของระบบเครื่องมือวัดแรงดันน้ำส่วนเกินในมวดดินทำให้ค่าที่วัดได้ไม่เป็นไปตามพฤติกรรมที่แท้จริงของตัวอย่างดินเหนียว



(a)

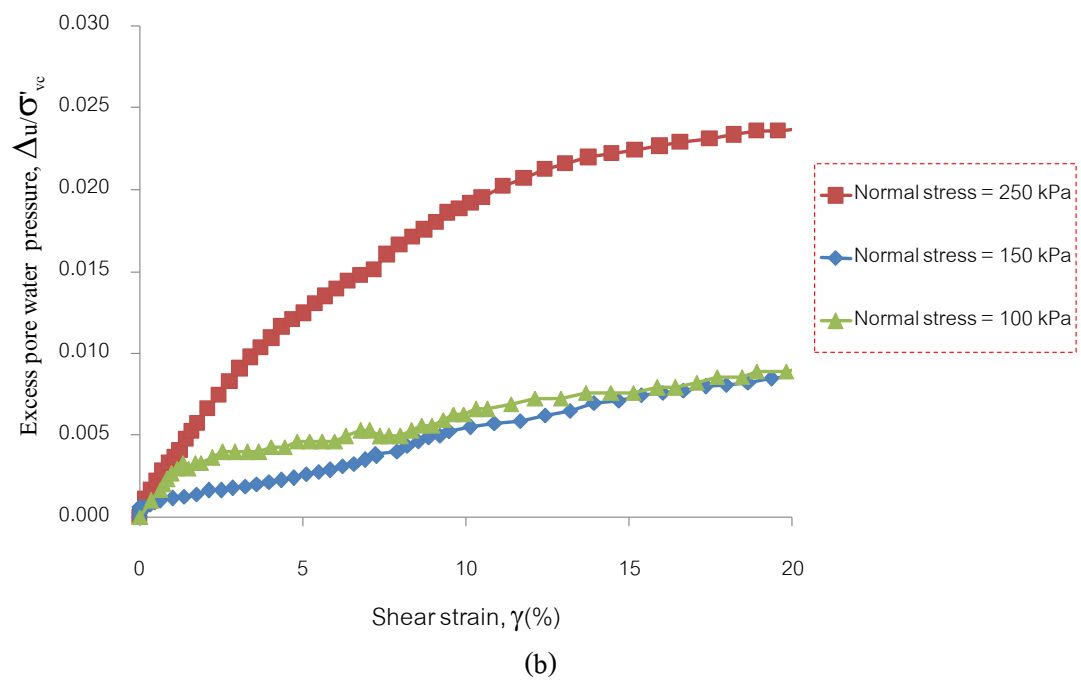
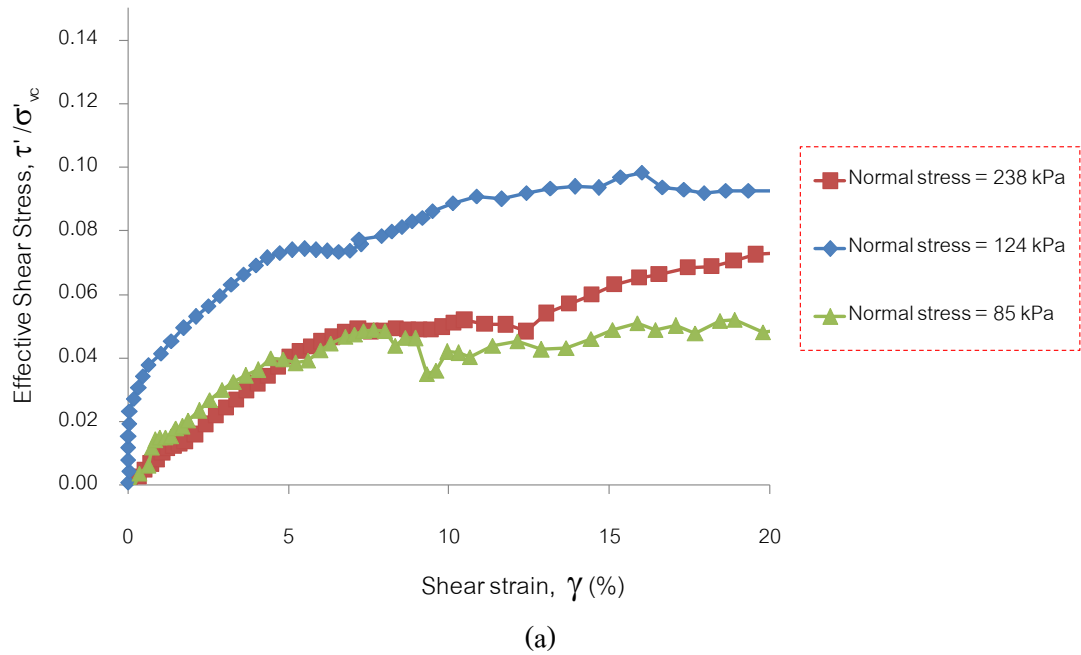


(b)

รูปที่ 4.8 ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายที่อัตราส่วนการอัดตัวแน่นปกติ

(a) ค่าความเค้นเฉือนกับค่าความเครียดเฉือน

(b) แรงดันน้ำส่วนเกินกับค่าความเครียดเฉือน



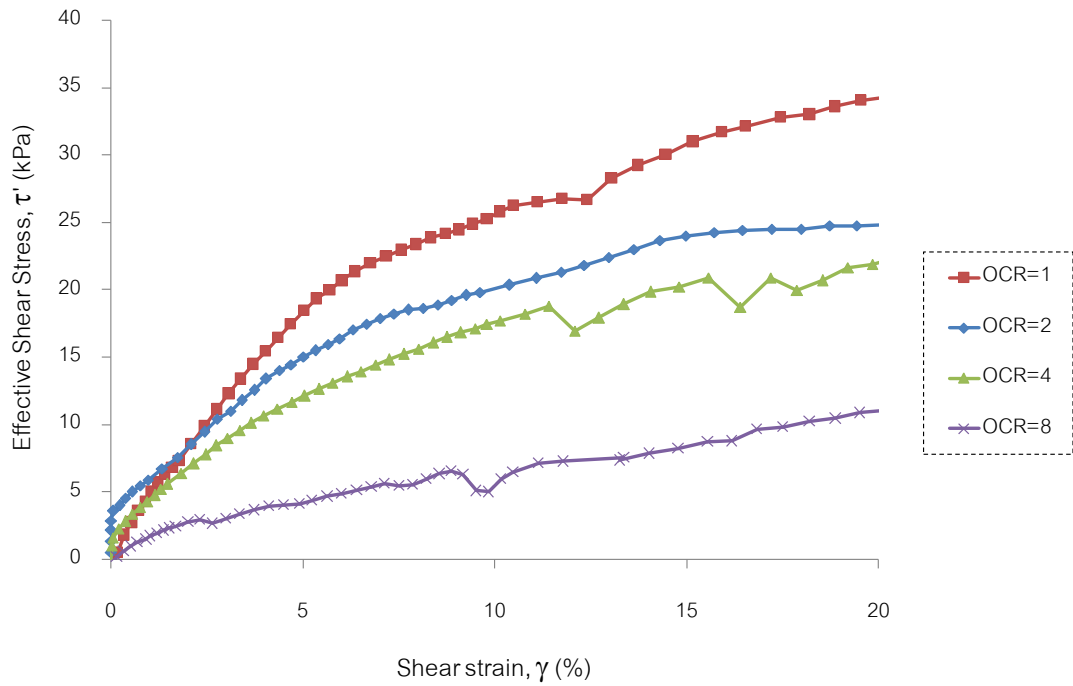
รูปที่ 4.9 การ Normalized ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายที่อัตราส่วนการอัดตัวแน่นปกติ

(a) ค่าความเค้นเฉือนกับค่าความเครียดเฉือน

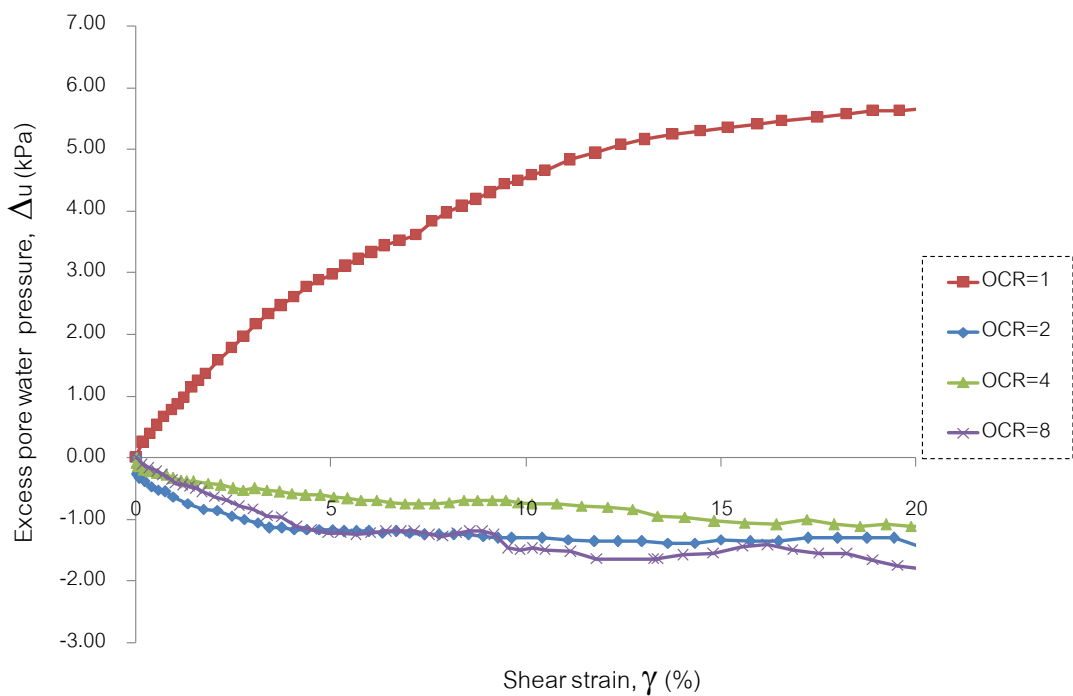
(b) แรงดันน้ำส่วนเกินกับค่าความเครียดเฉือน

ผลการทดสอบแรงเฉือนตรงอย่างง่ายโดยทำการทดสอบที่ค่าของอัตราความเครียด 0.075 เปอร์เซนต์ต่อนาที มาเปรียบเทียบกันในแต่ละค่า OCR ผลที่ได้สามารถนำมาวิเคราะห์ผลกระทบของ OCR ที่มีต่อดินเหนียวปากพั้ง โดยค่าความสัมพันธ์ระหว่างค่าอัตราความเครียดที่มีผลต่อค่า OCR ต่างๆ ได้แสดงดังรูปที่ 4.10 ทำการสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเฉือนประสิทธิผลกับการเปลี่ยนแปลงความเครียดเฉือนพบว่า ค่า OCR ที่เพิ่มขึ้นค่าเค้นเฉือนประสิทธิผลจะลดลงตามลำดับ ดังรูปที่ 4.10 (a) เมื่อนำค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นระหว่างการเฉือนกับค่าความเครียดเฉือนมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ ดังแสดงในรูปที่ 4.10(b) จากรูปพบว่าค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่ OCR 1 ค่าที่ได้จะเป็นค่าทางบวกซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมของดิน และค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่ OCR เท่ากับ 2, 4 และ 8 ค่าแรงดันน้ำส่วนเกินจะเป็นค่าทางลบซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบแรงเฉือนแบบตรงอย่างง่ายของ นิรุจน์(2550) ที่ทดสอบ โดยเครื่องทดสอบที่นำเข้ามาจากต่างประเทศ

เมื่อนำผลการทดสอบมาทำบรรทัดฐาน(Normalized) เพื่อให้สามารถเห็นความชัดเจนของกราฟความสัมพันธ์มากยิ่งขึ้น สำหรับการทดสอบที่เปลี่ยนแปลงค่า OCR โดยสามารถสรุปได้ดังนี้ กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนประสิทธิผลกับความเค้นเฉือนประสิทธิผลแนวตั้งที่ทำการบรรทัดฐานกับความเค้นเฉือนประสิทธิผล (σ'_{vc}) จากแนวโน้มของกราฟพบว่าไม่เป็นไปตามพฤติกรรมที่แท้จริงของดิน เนื่องจากค่าการวัดแรงดันน้ำส่วนเกินที่น้อยมากทำให้เมื่อมาหักลบเพื่อคำนวณค่าความเค้นเฉือนประสิทธิผลแนวตั้งทำให้ค่าความเค้นเฉือนประสิทธิผลแนวตั้งมีค่าไม่เปลี่ยนแปลงทำให้กราฟไม่วิ่งเข้าหาเส้นการวิบัติ (K_f - line) เมื่อนำค่าความเค้นเฉือนประสิทธิผลกับค่าความเครียดเฉือนที่เปลี่ยนแปลง ดังรูปที่ 4.11(a) พบว่า ที่ OCR เท่ากับ 8 ค่าความเค้นเฉือนประสิทธิผลจะมีค่าสูงสุด รองลงมา ที่ OCR เท่ากับ 4, 2 และ 1 ตามลำดับ และผลของค่าแรงดันน้ำส่วนเกิน ดังรูปที่ 4.11(b) เป็นไปตามทฤษฎีและสอดคล้องกับพฤติกรรมของผลการทดสอบแรงเฉือนแบบตรงอย่างง่ายจากเครื่องนำเข้ามาจากต่างประเทศของนิรุจน์ (2550)



(a)

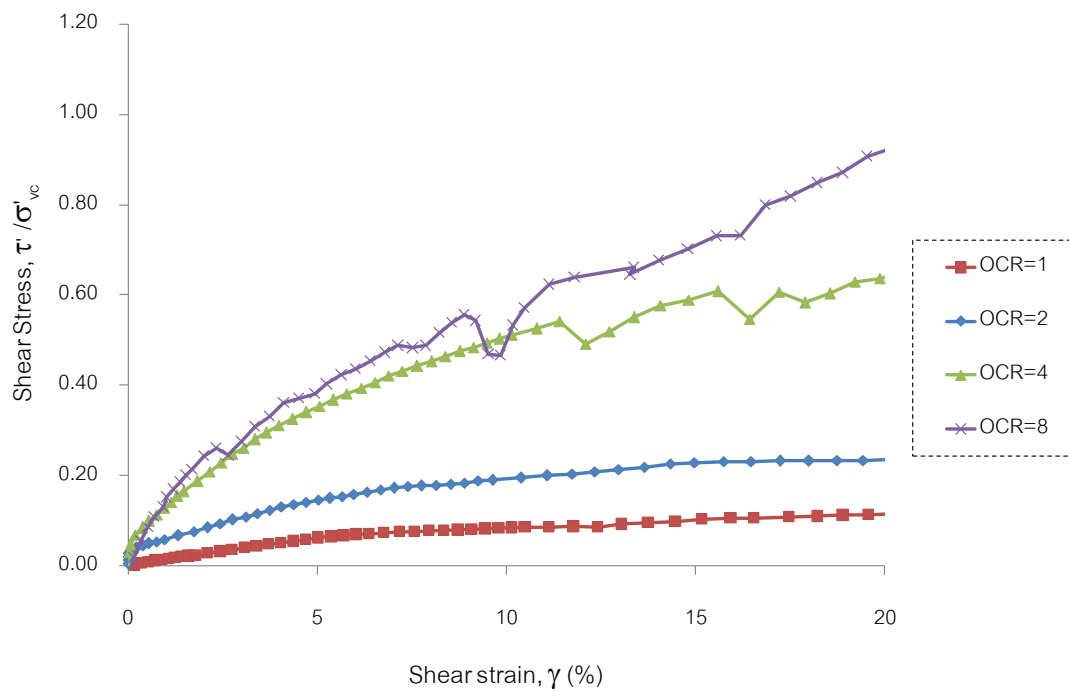


(b)

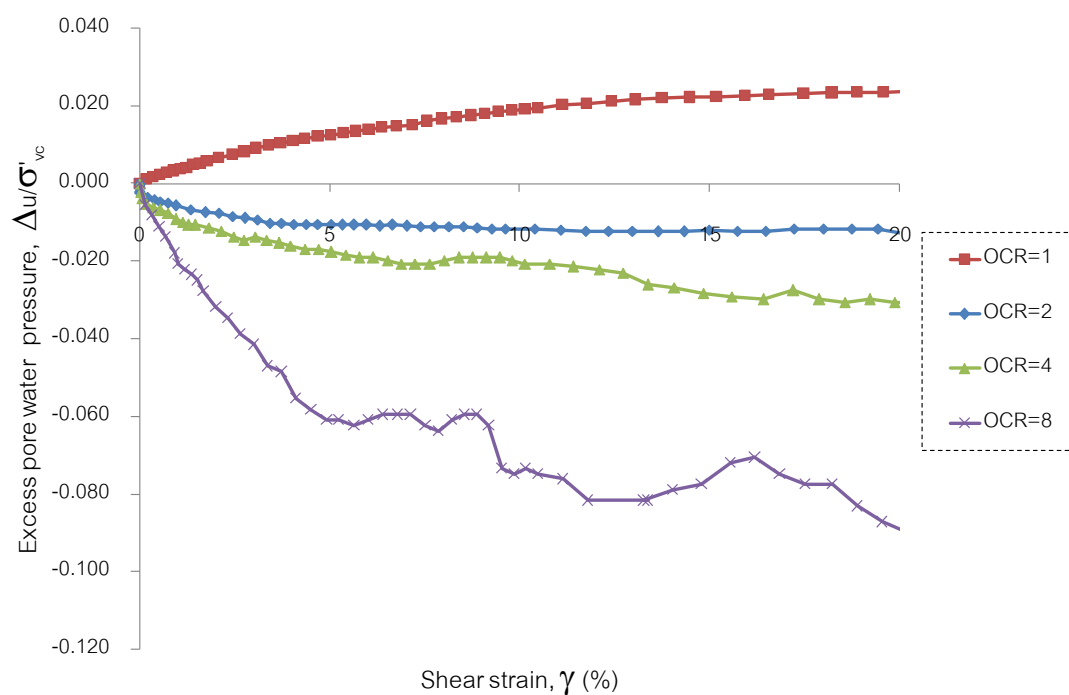
รูปที่ 4.10 ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายที่อัตราส่วนการอัดตัวแน่นเกินตัว

(a) ค่าความเค้นเฉือนกับค่าความเครียดเฉือน

(b) แรงดันน้ำส่วนเกินกับค่าความเครียดเฉือนที่อัตราส่วนการอัดตัวแน่นเกินตัว



(a)



(b)

รูปที่ 4.11 Normalized ผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่าย ที่อัตราส่วนการอัดตัวแน่นเกินตัว

(a) ค่าความเค้นเฉือนกับค่าความเครียดเฉือน

(b) แรงดันน้ำส่วนเกินกับค่าความเครียดเฉือนที่อัตราส่วนการอัดตัวแน่นเกินตัว

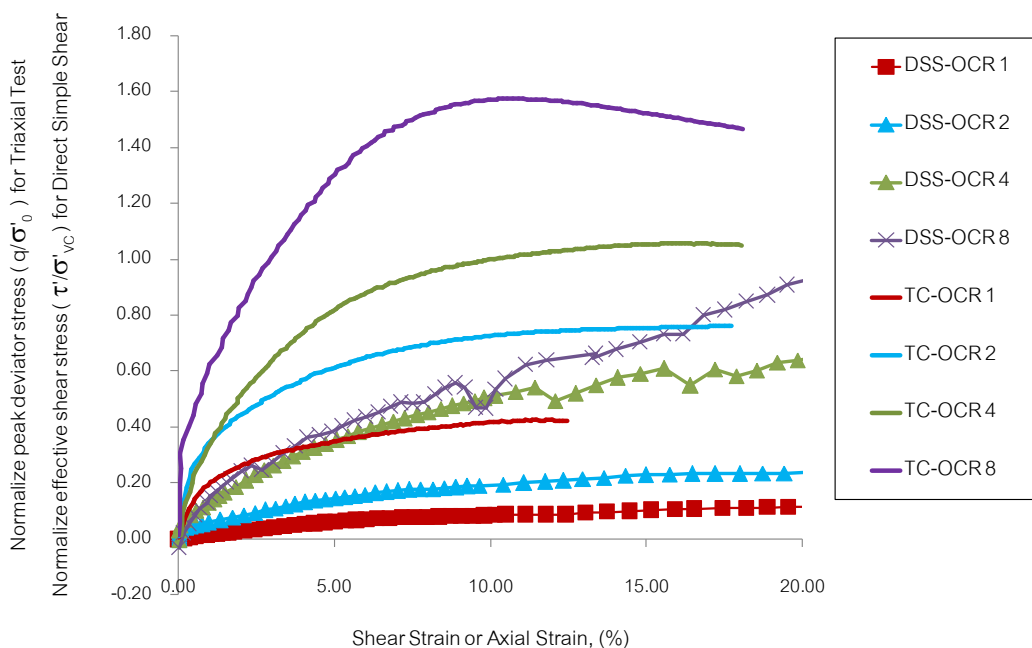
4.4 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องมืออุปกรณ์การทดสอบการเหนือนแบบตรง

ผลเปรียบเทียบในรูปของกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความเค้นเบี่ยงเบนที่ทำการบรรทัดฐานด้วยค่าความเค้นประสิทธิผลเทียบกับค่าอัตราความเครียดของผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength) ที่อัตราการอัดแน่นเกินตัวที่ 1, 2, 4 และ 8 เปรียบเทียบผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength) โดยวิธีการทดสอบแรงอัดสามแกนของศิริพร (2556) ที่อัตราความเครียดเดียวกัน คือ 0.075 เปอร์เซ็นต์ต่อนาที สามารถแสดงดังตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 ค่าความเค้นเบี่ยงสูงสุดที่ทำบรรทัดฐานด้วยค่าความเค้นประสิทธิผลก่อนเหนือน

Test	Normalize peak deviator stress (q/σ'_0) for Triaxial Test			
	Normalize effective shear stress (τ'/σ'_{vc}) for Direct Simple Shear			
OCR	1	2	4	8
DSS	0.114	0.236	0.577	0.928
Triaxial	0.426	0.761	1.056	1.514

จากตารางที่ 4.2 พบว่าค่าความเค้นเบี่ยงสูงสุดที่ทำบรรทัดฐานด้วยค่าความเค้นประสิทธิผลก่อนเหนือนจะเพิ่มขึ้นตามอัตราการอัดตัวแน่นเกินตัวเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบแรงอัดสามแกนของศิริพร (2556) โดยค่าการทดสอบแรงอัดสามแกนจะมีค่าสูงกว่าการทดสอบแรงเหนือนแบบตรงอย่างง่ายที่ทดสอบโดยตัวอย่างดินเหนียวอ่อนปากพวง ซึ่งสอดคล้องตามทฤษฎี ค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำของการทดสอบแรงอัดสามแกนจะมีค่าสูงกว่าค่าจากการทดสอบแรงเหนือนตรงอย่างง่าย ดังแสดงในรูปที่ 4.12 ได้ทำการเปรียบเทียบผลการทดสอบที่อัตราความเครียด 0.075 เปอร์เซ็นต์ต่อนาที ระหว่างผลการทดสอบด้วยวิธีแรงอัดสามแกนและแรงเหนือนตรงอย่างง่ายที่ใช้ตัวอย่างดินเหนียวอ่อนปากพวงเดียวกัน จากกราฟพบว่าค่าความเค้นเบี่ยงสูงสุดที่ทำบรรทัดฐานด้วยค่าความเค้นประสิทธิผลก่อนเหนือนที่อัตราการอัดแน่นเกินตัวที่ 1, 2, 4 และ 8 พบว่ากราฟมีแนวโน้มในทิศทางเดียวกันแต่ค่าจากวิธีการเหนือนแบบตรงอย่างง่ายมีค่าต่ำกว่า ซึ่งอาจจะเป็นผลของระบบเครื่องมือวัดซึ่งจะทำการศึกษาและพัฒนาต่อไป แต่ผลการทดสอบข้างต้นสามารถแสดงให้เห็นว่าเครื่องที่พัฒนาขึ้นมาสามารถทดสอบได้จริงลดการนำเข้าเครื่องทดสอบที่มีราคาสูงจากต่างประเทศแต่ต้องพัฒนาระบบวัดค่าให้มีประสิทธิภาพเพียงตรงมากยิ่งขึ้น

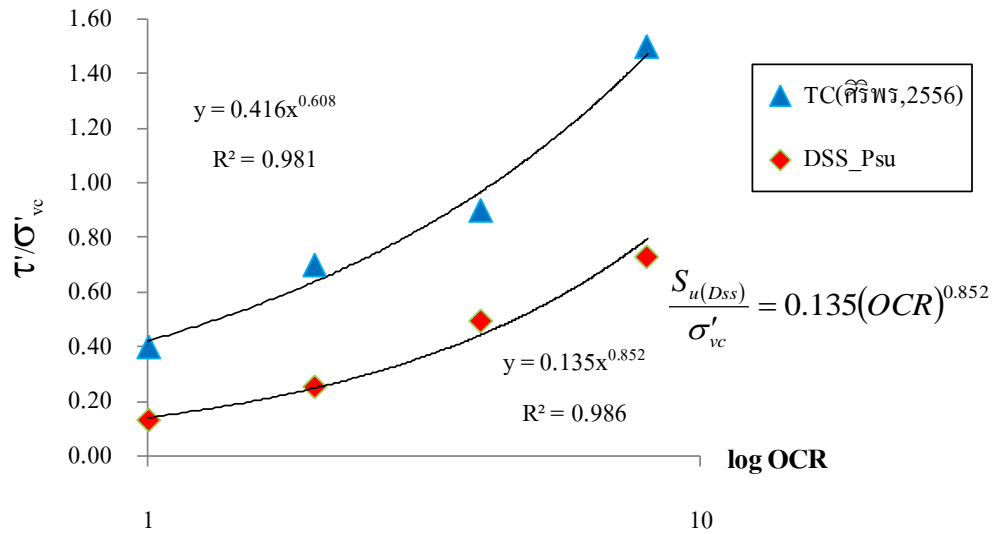


รูปที่ 4.12 ผลทดสอบด้วยวิธีแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายกับเครื่องทดสอบที่พัฒนาขึ้นมากับการทดสอบแรงอัดสามแกนของ ศิริพร (2556)

5.5 ผลการประมาณกำลังรับแรงเฉือนทางเดียวอย่างง่ายแบบไม่ระบายน้ำด้วยวิธี SHANSEP (Stress History and Normalized Soil Engineering Properties)

จากผลการทดสอบจะนำค่าแรงเฉือนสูงสุดที่วัดได้ ที่การอัดตัวแน่นเกินตัวแตกต่างกัน และนำมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ในการประมาณค่ากำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำตามวิธี SHANSEP ซึ่งผลการทดสอบนั้นมีค่าอยู่ระหว่างการทดสอบการทดสอบแรงอัดสามแกนชนิดอัด (Compression) ที่ทดสอบโดยศิริพร (2556) สามารถแสดงดังรูปที่ 4.13

กำลังรับแรงเฉือนแบบไม่ระบายน้ำด้วยวิธี SHANSEP จากการศึกษาพบว่า กราฟความสัมพันธ์ในการประมาณกำลังรับแรงเฉือนอย่างง่ายแบบไม่ระบายน้ำด้วยวิธี SHANSEP สามารถสร้างสมการความสัมพันธ์ได้ คือ $S_{u(DSS)} / \sigma'_{vc} = 0.135(OCR)^{0.852}$



รูปที่ 4.13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับค่าการอัดตัวแน่นเกินตัว (SHANSEP)

จากกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเค้นเฉือนกับค่าการอัดตัวแน่นเกินตัว (SHANSEP) พบว่า ค่าความชันของกราฟจากผลการทดสอบแรงเฉือนแบบตรงอย่างง่ายจากเครื่องทดสอบที่พัฒนาขึ้นมา มีค่าความชันน้อยกว่าทำให้กราฟที่ได้อยู่ใต้กราฟผลการทดสอบแรงอัดสามแกนชนิดอัด (Compression) ที่ทดสอบโดยศิริพร (2556) โดยใช้ตัวอย่างดินชนิดเดียวกัน

บทที่ 5

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพัฒนาเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายสำหรับการเฉือนทางเดียวซึ่งสามารถจำลองระนาบการวิบัติที่สอดคล้องกับการวิบัติในธรรมชาติได้และผลการทดสอบสามารถประมาณกำลังรับแรงเฉือนอย่างง่ายแบบไม่ระบายน้ำด้วยวิธี SHANSEP ของดินเหนียวอ่อนปากพนัง

5.1 สรุปผลพัฒนาเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายสำหรับการเฉือนทางเดียว

เครื่องทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายที่พัฒนาการให้ความเค้นแนวในดิ่งแก่ตัวอย่างทดสอบโดยใช้แกนทดสอบให้น้ำหนักในอัตราทด 1:11 แล้วใช้มอเตอร์เกียร์ทดในการเฉือนตัวอย่าง สามารถทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของตัวอย่างที่อัตราความเครียด 0.02 ถึง 0.10 เปอร์เซนต์ต่อวินาที ตัวอย่างทดสอบมีขนาด 7.25 มิลลิเมตร สูง 2.80 มิลลิเมตร ใช้เมนเบรนท์หล่อขึ้นเองหุ้มตัวอย่างและใช้สแตคริงควบคุมปริมาตรให้คงที่ระหว่างการทดสอบ มีอุปกรณ์บันทึกข้อมูลที่สามารถเชื่อมต่อกับคอมพิวเตอร์ควบคุม อุปกรณ์การตรวจวัดได้แก่ โหลดเซลล์ (Load cell) วัดค่าแรงกดในแนวดิ่งจะได้แรงกดทับที่ตัวอย่าง ทดสอบและการวัดค่าแรงกดในแนวราบได้ค่าแรงเฉือนที่เกิดขึ้นในตัวอย่างทดสอบ ทรานสดิวเซอร์วัดการเคลื่อนที่ (Displacement transducer) หรือ LVDT ใช้วัดค่าการเคลื่อนที่ในแนวดิ่งได้ค่าการทรุดตัวของตัวอย่างดินทดสอบและวัดค่าการเคลื่อนที่ในแนวราบในขั้นตอนการเฉือนตัวอย่างดิน ทรานสดิวเซอร์วัดความดัน (Pressure transducer) ใช้สำหรับการวัดค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้นขณะทำการเฉือนตัวอย่างดิน

5.2 สรุปผลการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบทางเดียว

ผลการศึกษาค่าอัตราการอัดแน่นเกินตัว (Over consolidation ratio, OCR) ที่แตกต่างกันที่มีต่อพฤติกรรมด้านกำลังรับแรงเฉือน (Shear strength) พฤติกรรมของแรงดันน้ำส่วนเกิน (Access pore pressure) ต่อดินเหนียวปากพนัง สามารถสรุปผลการทดสอบทั้งหมดได้ดังนี้

การทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายแบบทางเดียว สามารถนำผลการทดสอบมาสร้างกราฟความสัมพันธ์ในการประมาณกำลังรับแรงเฉือนอย่างง่ายแบบไม่ระบายน้ำด้วยวิธี SHANSEP ซึ่งสามารถสร้างสมการความสัมพันธ์ได้ คือ $S_{u(Dss)} / \sigma'_{vc} = 0.135(OCR)^{0.852}$

ผลการทดสอบนำมาสร้างกราฟของการ Normalized Stress Path และสร้างเส้นวิบัติตามสมมติฐานของมอร์-คูลอมบี้ (Failure envelope) เพื่อหาค่า c' และ ϕ' พบว่ากราฟของการ Normalized Stress Path ไม่สามารถแสดงค่า c' และ ϕ' ได้เนื่องจากผลของแรงดันน้ำส่วนเกินที่วัดได้มีค่าน้อยซึ่งเป็นผลจากข้อบกพร่องของระบบเครื่องมือวัดแรงดันน้ำส่วนเกิน แต่ผลจากแนวโน้มของกราฟการทดสอบมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกับทฤษฎีของพฤติกรรมการรับแรงของดินเหนียว ซึ่งสามารถสร้างความเชื่อมั่นแก่เครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบในระดับหนึ่ง แต่ต้องแก้ไขจุดบกพร่องที่กล่าวมาข้างต้นจะทำให้เครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบมีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น

5.3 สรุปผลการทดสอบความถูกต้องของเครื่องทดสอบที่พัฒนาขึ้นมา

การทดสอบเปรียบเทียบระหว่างผลการความเค้นเบี่ยงเบนที่ทำการบรรทัดฐานด้วยค่าความเค้นประสิทธิผลเฉลี่ยกับค่าอัตราความเครียดของผลการทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำ (Undrained Shear Strength) ที่อัตราการอัดแน่นเกินตัวที่ 1, 2, 4 และ 8 ของวิธีการทดสอบแรงอัดสามแกนของศิริพร (2556) ที่อัตราความเครียดเดียวกันด้วยดินเหนียวอ่อนปากพนัง พบว่าแนวโน้มพฤติกรรมการรับแรงของดินมีความสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกันแต่ค่าที่ได้จากการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายมีค่าที่น้อยกว่าผลการทดสอบด้วยวิธีแรงอัดสามแกนชนิดแรงอัด ซึ่งตรงกับผลงานวิจัยในอดีต ค่ากำลังรับแรงเฉือนที่ได้จากวิธีการทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายจะอยู่ระหว่างผลการทดสอบด้วยวิธีทดสอบแรงอัดสามแกนชนิดแรงอัดและแรงดึง

5.4 ข้อเสนอแนะ

5.4.1 การทดสอบจากแรงเฉือนทางตรงอย่างง่ายของเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น อุปกรณ์ที่ใช้บันทึกค่าต่างๆ กระแสไฟฟ้าที่ต่อเนื่องและสัญญาณรบกวนต่างเป็นสิ่งที่มีความสำคัญในการทดสอบ ส่งผลต่อความเที่ยงตรงของผลการทดสอบ

5.4.2 ความละเอียดของข้อมูลที่ได้จากจะขึ้นอยู่กับความสามารถของอุปกรณ์ตรวจวัดและพร้อมของอุปกรณ์

5.4.3 ระบบการวัดค่าแรงดันน้ำส่วนเกินมีข้อบกพร่องอย่างมากที่ส่งผลต่อผลการทดสอบ ซึ่งก่อนการทำให้ตัวอย่างอิมตัว ระบบการทดสอบควรเป็นระบบปิดต้องทำการดูอากาศภายในระบบให้หมดก่อน เมื่อทำการตรวจวัดค่าแรงดันน้ำส่วนเกินอากาศจะละลายอยู่ในน้ำทำให้ค่าที่วัดได้มีค่าน้อยจากความเป็นจริง

5.4.4 การขันห้ามแกนกดในดิ่งในขั้นตอนการเชื่อมควรปรับปรุงแก้ไข เนื่องจากวิธีการดังกล่าวส่งผลต่อการลดทอนน้ำหนักกดแนวตั้ง ทำให้ความเค้นกดทับตัวอย่างไม่สอดคล้องกับน้ำหนักถ่วงที่ใส่ในโปรแกรมทดสอบ

บรรณานุกรม

- ธนกรและสุเชษฐ์. (2551). พฤติกรรมความหนืดแบบไม่เชิงเส้นของดินเหนียวกรุงเทพฯ. การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 13. โรงแรมจอมเทียน ปาล์ม บีช พัทยา จ. ชลบุรี 14-16 พฤษภาคม 2551.
- ธวัชชัย สังขะวิไล (2548). การทดสอบแรงเฉือนแบบตรงอย่างง่ายในดินเหนียวกรุงเทพฯ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- นิรุจน์ ก้อนคง (2550). พฤติกรรมเฉือนไม่ระบายน้ำแบบวัฏจักรของดินเหนียวกรุงเทพฯโดยเครื่องมือทดสอบแรงเฉือนอย่างง่าย. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- มณเฑียร กังศศิเทียม. (2541). กลศาสตร์ของดินด้านวิศวกรรม. สำนักพิมพ์โดยสมาคมศิษย์เก่าวิศวกรรมชลประทานในพระบรมราชูปถัมภ์
- วิศิษฐ์ อยู่ยงวัฒนา. (2540). ปฐพีกลศาสตร์. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยรังสิต. จังหวัดปทุมธานี
- วิระ ศักดิ์สุพรรณ. (2549). การประมาณค่าสัมประสิทธิ์ความหนืดของดินเหนียวกรุงเทพฯโดยการทดสอบการเปลี่ยนแปลงอัตราความเครียด. วิทยานิพนธ์ปริญญาเอก. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
- ศิริพร ชีวะกุล. (2556). การศึกษาพฤติกรรมความหนืดแบบไม่เชิงเส้นของดินเหนียวปากพนัง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
- สถาพร คูวิจิตรจากร. (2541). ทดลองปฐพีกลศาสตร์. กรุงเทพฯ : ไลบรารี นาย พับลิชชิง
- สถาพร คูวิจิตรจากร. (2542). ปฐพีกลศาสตร์. กรุงเทพฯ : ไลบรารี นาย พับลิชชิง
- สุขสันต์ หอพิบูลสุข และรุ่งราววัลย์ ราชัน. (2548). ปฐพีกลศาสตร์. สำนักพิมพ์แมคกรอ – ฮิล กรุงเทพมหานคร
- สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง. (2551). ปฐพีกลศาสตร์ : หลักการพื้นฐาน. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร
- สุเชษฐ์ ลิขิตเลอสรวง. (2553). ปฐพีกลศาสตร์ : พลาสติกซิตีและทฤษฎีสถานะวิกฤต. สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย กรุงเทพมหานคร
- อัครเดช แซ่จิ้ว. (2552). คุณสมบัติของดินเหนียวปากพนัง. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

- ASTM Standard. Standard Test Method for 1-D Consolidation Properties of Soils, Designation: D 2435 – 80, in Annual Book of ASTM Standards, 04.08: 378-384,1980.
- ASTM Standard. Standard Test Method for Consolidated Undrained Direct Simple Shear Testing of Cohesive Soils, Designation: D 6528 – 00, in Annual Book of ASTM Standards.04.08, 2000.
- Badet, and Jean-Pierre. Experimental Soil Mechanics. LA: Prentice hall, 1997.
- Bjerrum L., and Landva A. Direct Simple Shear Tests on Norwegian Quick Clay. Geotechnique, 16.01, 1966: 1-20.
- Burland E.W., and Tsai C.T. Dissipation of Pore Pressure During One Dimensional Consolidation on an Artificial Marine Clay, AIT Research Report No. 40, 1973.
- Das.Braja M.Principal of Soil Dynamic .PWS-KENT Publishing Company:BOSTON. 1993
- DeGroot D.J., Germaine J.T. and Ladd C.C., (1994). Effect of Non-uniform Stresses
- T. Sivadass,and C.Y. Lee. Simple Shear Testing of Residual Soils with High Silt Content, ICCBT 2008 – E, 2008.

ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

ผลการทดสอบการอัดตัวคาน้ำแบบหนึ่งมิติ

ภาคผนวก ข.

ผลการทดสอบแรงเฉือนแบบตรงอย่างง่าย ไม่ระบายน้ำ

ภาคผนวก ค.

คู่มือการใช้เครื่องทดสอบแรงเฉือนแบบตรงอย่างง่าย (Direct Simple Shear Apparatus)

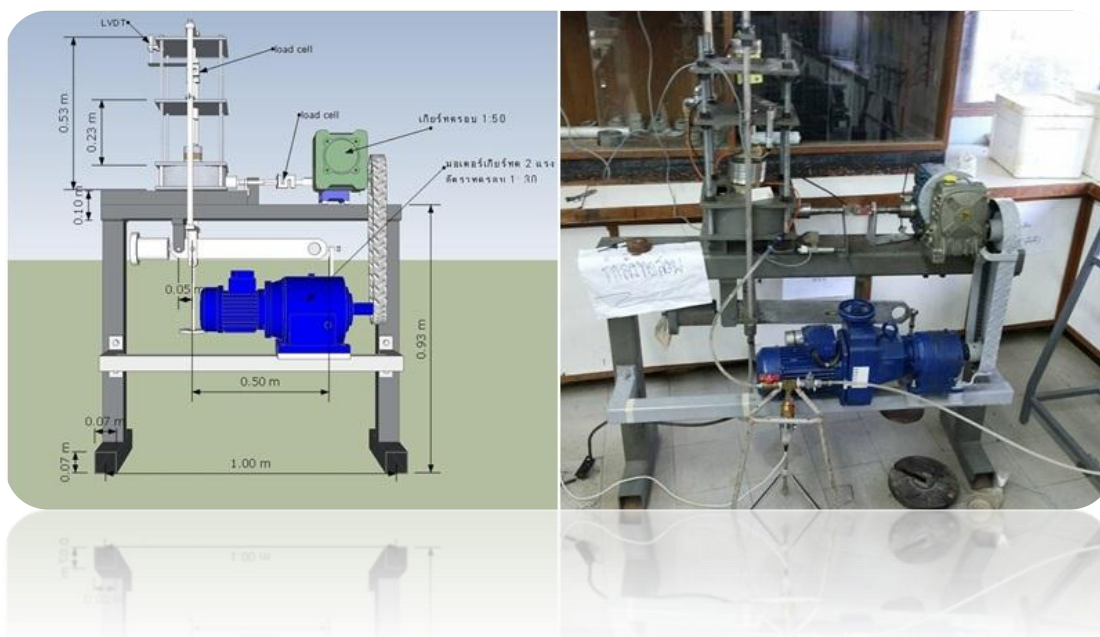


คู่มือการใช้งาน

เครื่องทดสอบแรงเฉือนแบบตรงอย่างง่าย

Direct Simple Shear Apparatus

PSU_DSS



พัฒนาโดย

นายวาริส บัวขาว

ผศ.ดร.ชนันท์ ชูบุปการ

ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

คำนำ

การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนของดินแบบไม่ระบายน้ำมีหลายวิธีด้วยกันแต่วิธีที่ง่ายและไม่ซับซ้อน คือ การทดสอบแรงเฉือนแบบตรง (Direct Shear Test) แต่เครื่องมือทดสอบแรงเฉือนแบบตรงยังมีข้อจำกัดในส่วนของระนาบการวิบัติ ซึ่งมีลักษณะที่ไม่ถูกต้องตามสภาพที่เกิดขึ้นจริง การทดสอบการเฉือนแบบตรงอย่างง่าย (Direct Simple Shear) เป็นอีกวิธีหนึ่งที่สามารถกำจัดเงื่อนไขของระนาบการวิบัติ การศึกษาและพัฒนาเครื่องมือและอุปกรณ์การทดสอบการเฉือนแบบตรงอย่างง่ายสำหรับการเฉือนทางเดียว (Monotonic) ขึ้นมาโดยใช้วัสดุอุปกรณ์ที่มีอยู่ในประเทศ ทั้งนี้เพื่อต้องการลดการนำเข้าเครื่องทดสอบจากต่างประเทศที่มีราคาสูง โดยที่คุณภาพเครื่องมืออุปกรณ์และวิธีการทดสอบยังคงเป็นไปตามมาตรฐานของ ASTM D 6525-00 เพื่อเป็นประโยชน์สำหรับนักศึกษาในระดับปริญญาตรีได้ใช้เครื่องทดสอบการปฏิบัติการทดสอบปฐพีกลศาสตร์ รวมถึงนักศึกษาในระดับปริญญาโทสามารถใช้งานในการทำวิจัยได้

รายงานฉบับนี้ได้นำเสนอรายละเอียดของการพัฒนาเครื่องมือ อุปกรณ์การทดสอบและการใช้งานเครื่องมือ อุปกรณ์การทดสอบการเฉือนแบบตรงอย่างง่ายที่พัฒนาขึ้นมา รายงานฉบับนี้ประกอบด้วยส่วนที่ 1 แสดงรายละเอียดเครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ทดสอบ ส่วนที่ 2 แสดงวิธีการใช้งานเครื่องมือ อุปกรณ์การทดสอบการเฉือนแบบตรงอย่างง่ายซึ่งประกอบด้วยวิธีการเตรียมตัวอย่าง ขั้นตอนการทดสอบและการใช้โปรแกรมบันทึกผลการทดสอบ

คณะผู้จัดทำขอขอบคุณพระคุณคณาจารย์ทุกท่านที่ให้การปรึกษาและแนะนำจนสามารถพัฒนาเครื่องมือทดสอบขึ้นมาสำเร็จไปด้วยดี และขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ในการสนับสนุนทุนวิจัยบางส่วน รวมถึงเพื่อนๆ พี่ๆ น้องนิสิต ป.โท วิศวกรรมโยธา(ธรณีเทคนิค) มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ช่วยลงมือลงแรงจนทำให้งานวิจัยเสร็จสมบูรณ์

นายวาริส บัวขาว
ผศ.ดร.ชนันท์ ชุบอุปการ

สารบัญ

เนื้อหา

หน้า

1. อุปกรณ์และส่วนประกอบเครื่องมือ อุปกรณ์การทดสอบการเหนือนแบบตรงอย่างง่าย
 - 1.1 อุปกรณ์การเตรียมตัวอย่าง
 - 1.2 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงเหนือนแบบตรงอย่างง่าย
 - 1.3 เครื่องมือตรวจวัดสำหรับเครื่องทดสอบ
2. วิธีการใช้งานเครื่องทดสอบการเหนือนแบบตรงอย่างง่าย
 - 2.1 การเตรียมตัวอย่าง
 - 2.2 การทดสอบกำลังรับแรงเหนือนแบบตรงอย่างง่าย
 - 2.3 การใช้โปรแกรมซอฟต์แวร์ DAS-100A ในการบันทึกข้อมูลการทดสอบ

1. อุปกรณ์และส่วนประกอบเครื่องมือ อุปกรณ์การทดสอบการเหือนแบบตรงอย่างง่าย

การทดสอบกำลังรับแรงเหือนของดิน โดยเครื่องทดสอบการเหือนแบบตรงอย่างง่าย เริ่มจากการเตรียมตัวอย่างดินสำหรับการทดสอบ จากนั้นนำตัวอย่างดินที่เตรียมไว้ นำมาขึ้นเครื่องทดสอบ การทดสอบมีเงื่อนไขการควบคุมปริมาตรให้คงที่ตลอดการทดสอบ โดยทั่วไปอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมปริมาตรให้คงที่มี 2 อย่างคือ การใช้เมนเบรนเสริมลวด (Reinforced Membrane) และการใช้สแตคริง (Stack rings) สำหรับเครื่องมือ อุปกรณ์การทดสอบที่พัฒนาขึ้นมาจะการใช้สแตคริงในการควบคุมปริมาตรให้คงที่ระหว่างการทดสอบ ส่วนประกอบของเครื่องมืออุปกรณ์การทดสอบการเหือนแบบตรงอย่างง่ายสามารถแยกย่อยดังนี้

1.1 อุปกรณ์การเตรียมตัวอย่าง

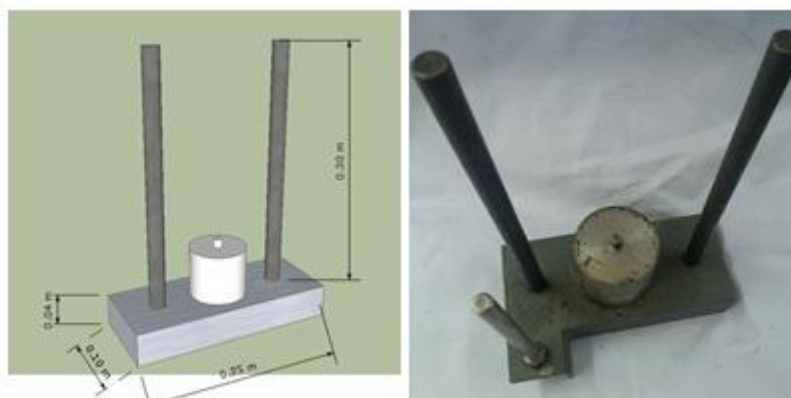
อุปกรณ์การเตรียมตัวอย่างที่สามารถเตรียมตัวอย่างดินคงสภาพได้ทั้งดินเหนียว ดินตะกอนทราย สำหรับใช้ในการพัฒนาเครื่องมืออุปกรณ์การทดสอบการเหือนแบบตรงอย่างง่าย ดังภาพที่ 1.1 ตัวอย่างภายหลังจากเตรียมมีขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง 72.5 มิลลิเมตร สูง 28.00 มิลลิเมตร หุ้มด้วยเมนเบรนและสแตคริง



ภาพที่ 1.1 ชุดอุปกรณ์การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบการเงื่อนไขแบบตรงอย่างง่าย
 อุปกรณ์ที่เตรียมตัวอย่างถูกออกแบบมาเพื่อสามารถเตรียมตัวอย่างคงสภาพได้ทั้ง
 ดินเหนียว ทรายและดินตะกอน โดยชุดอุปกรณ์การเตรียมตัวอย่าง ประกอบด้วยดังนี้

1.1.1 แท่นเตรียมตัวอย่าง

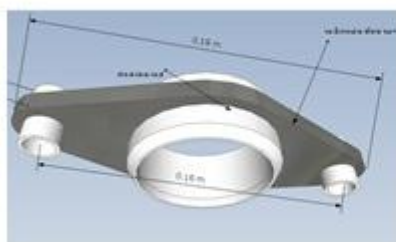
อุปกรณ์หลักในการเตรียมตัวอย่าง ประกอบด้วย ฐานที่มีเสาเหล็ก 2 เสายึดติดทำ
 หน้าที่เป็นตัวกำหนดแนว แท่นวางตัวอย่างทำจากเหล็กเพลากลมตรงกลางมีเดือยทำหน้าที่เป็นตัว
 ยึดฐานล่าง (Bottom) ของตัวอย่างดินไม่ให้เคลื่อนที่ ดังภาพที่ 1.2



ภาพที่ 1.2 แสดงแบบแท่นเตรียมตัวอย่าง

1.1.2 อุปกรณ์ตัดตัวอย่าง

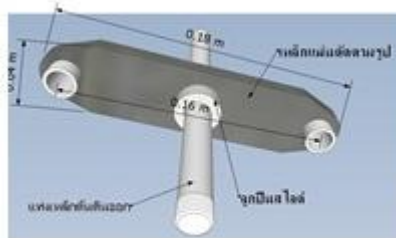
ขนาดของตัวอย่างที่ใช้ในการทดสอบถูกกำหนดโดยขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของอุปกรณ์ตัดตัวอย่าง โดยอุปกรณ์ตัดตัวอย่างนี้ประกอบด้วยแผ่นเหล็กตัดตามรูป ยึดติดกับท่อ สเตนเลสกลางที่สามารถสวมเข้าแท่นเตรียมตัวอย่างได้เพื่อเป็นแนวในการตัดตัวอย่างและโดยท่อสเตนเลสกลางมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางภายใน 72.5 มิลลิเมตร สูง 28 มิลลิเมตร ภาพที่ 1.3



ภาพที่ 1.3 แสดงอุปกรณ์ตัดตัวอย่าง

1.1.3 อุปกรณ์ดันตัวอย่างออกจากอุปกรณ์ตัดตัวอย่าง

ทำหน้าที่ในการดันตัวอย่างหลังจากตัดตัวอย่างด้วยอุปกรณ์ตัดแล้ว มีลักษณะเป็นแท่งเหล็กที่ยึดด้วยเกลียวกับฝาบน (Top cap) ของตัวอย่างดินเคลื่อนขึ้นลงตามรางลูกปืนสไลด์ที่ติดกับแผ่นเหล็กที่สามารถสวมเข้ากับเสาของแท่นเตรียมตัวอย่าง ดังภาพที่ 1.4



ภาพที่ 1.4 แสดงชุดดันตัวอย่างดิน

1.1.4 อุปกรณ์ช่วยสวมยางหุ้มตัวอย่าง

เป็นอุปกรณ์ในการช่วยให้การหุ้มตัวอย่างทำให้ตัวอย่างถูกรบกวนน้อยที่สุด โดยอุปกรณ์หุ้มตัวอย่างดินนี้มีลักษณะเป็นท่อสเตนเลสกลางยึดติดกับเหล็กแผ่นที่สามารถสวมเข้ากับเสาของ

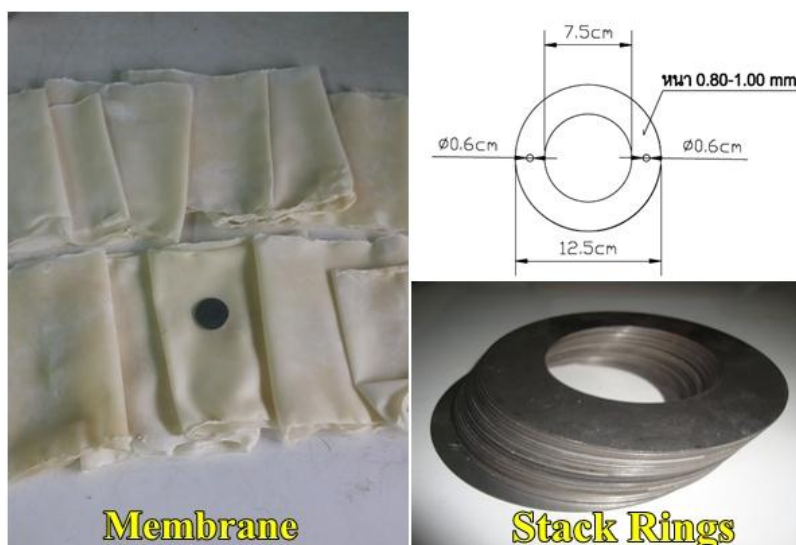
แท่นเตรียมตัวอย่าง ตรงกลางของท่อสแตนเลสทำการเจาะรูไว้สำหรับต่อกับสายยางไว้ดูอากาศทำ
ให้ถูกยางหุ้มตัวอย่างแนบสนิทกับชุดสวมยางหุ้มตัวอย่างดินดังภาพที่ 1.5



ดั่งภาพที่ 1.5 แสดงอุปกรณ์สวมยางหุ้มตัวอย่างดิน

1.1.5 เมมเบรนและสแตคริง

เป็นอุปกรณ์ในการควบคุมปริมาตรตัวอย่างให้คงที่ โดยเมมเบรนทำจากยาง
ธรรมชาติถูกหล่อขึ้นมาจากส่วนผสมเดียวกับการหล่อถุงมือยางทางการแพทย์ ส่วนสแตคริงหรือ
แผ่นสแตนเลสบางๆ มีลักษณะเป็นวงแหวนวางซ้อนกันเป็นชั้นๆ ดังภาพที่ 1.6



ภาพที่ 1.6 แสดงเมมเบรนและสแตคริง

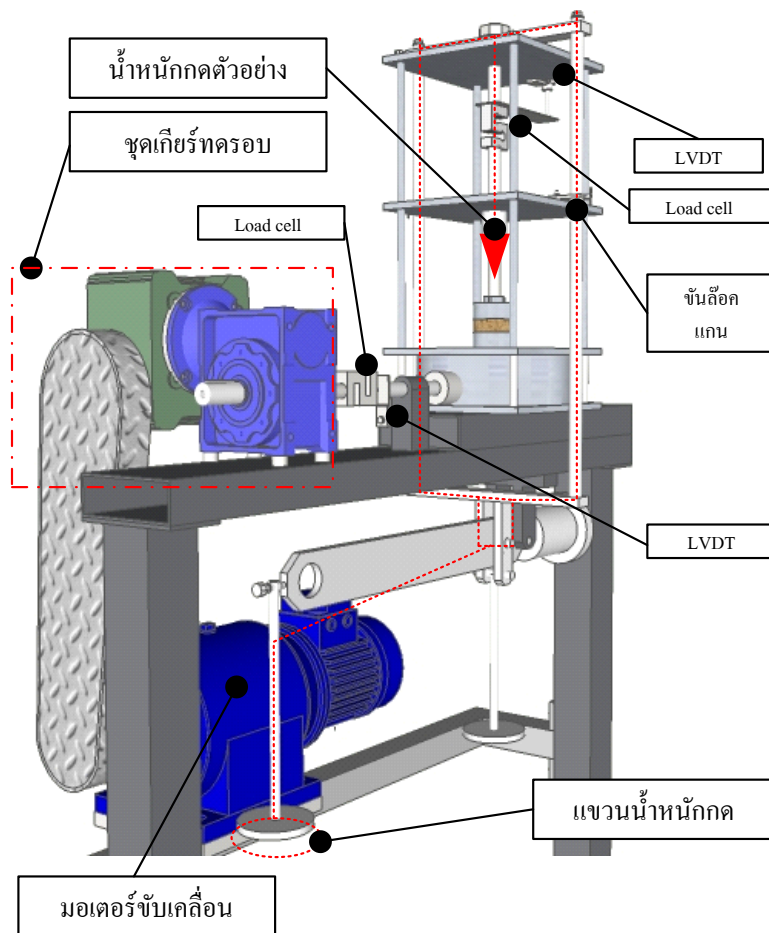
1.2 เครื่องทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบตรงอย่างง่าย

เครื่องทดสอบถูกออกแบบโดยยึดหลักการตามมาตรฐานของ ASTM D 6525-00 (Standard
Test Method for Consolidated Undrained Direct Simple Shear Testing of Cohesive Soils) โดย
หลักการทำงานของเครื่องทดสอบการเฉือนแบบตรงอย่างง่ายนี้ สามารถแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ
การให้น้ำหนักกดตัวอย่างดินและการเฉือนตัวอย่างดิน โดยเครื่องทดสอบการเฉือนแบบตรงอย่าง

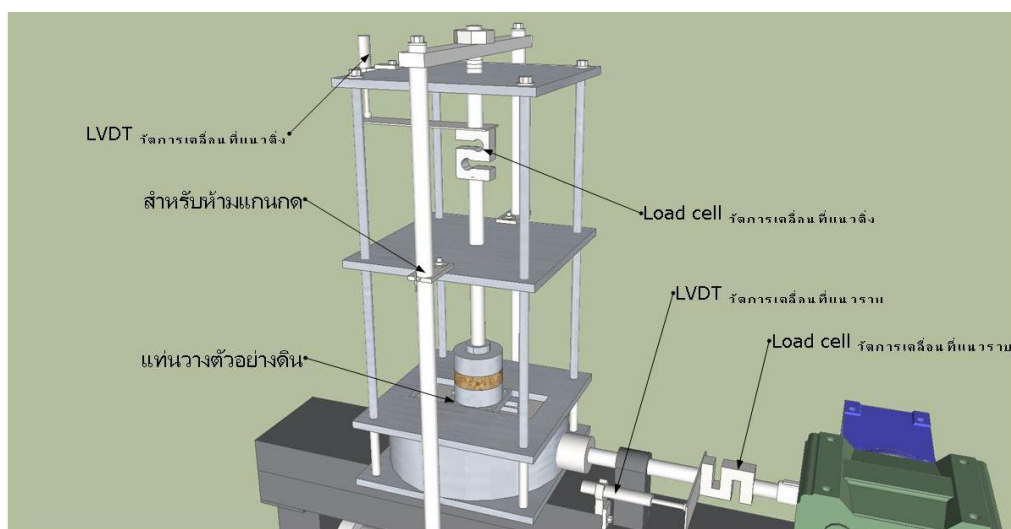
ง่ายที่พัฒนาขึ้นมาดังภาพที่ 1.7 และ 1.8 จากรูปการให้น้ำหนักกดตัวอย่างดินในแนวดิ่งจะใช้หลักการคานงัด ซึ่งมีอัตราส่วน 1:11 ติดตั้งอุปกรณ์วัดในการเคลื่อนตัว 2 ตัว สำหรับขั้นตอนการเคลื่อนตัวอย่างดินจะใช้มอเตอร์เกียร์ ขนาด 2 แรง ต่อเข้ากับชุดเกียร์ทศรอบ (Worm Gear) ที่ายสุดสามารถทำการเคลื่อนตัวอย่างที่อัตราเลื่อนดังตารางที่ 1.1

ตารางที่ 1.1 แสดงผลการสอบเทียบความเร็วเคลื่อนตัวอย่างกับวาล์วปรับความเร็ว

สเกล	อัตราความเร็วในการเลื่อน (มิลลิเมตร/นาที)
20	0.024
40	0.072
60	0.103
80	0.134
100	0.161



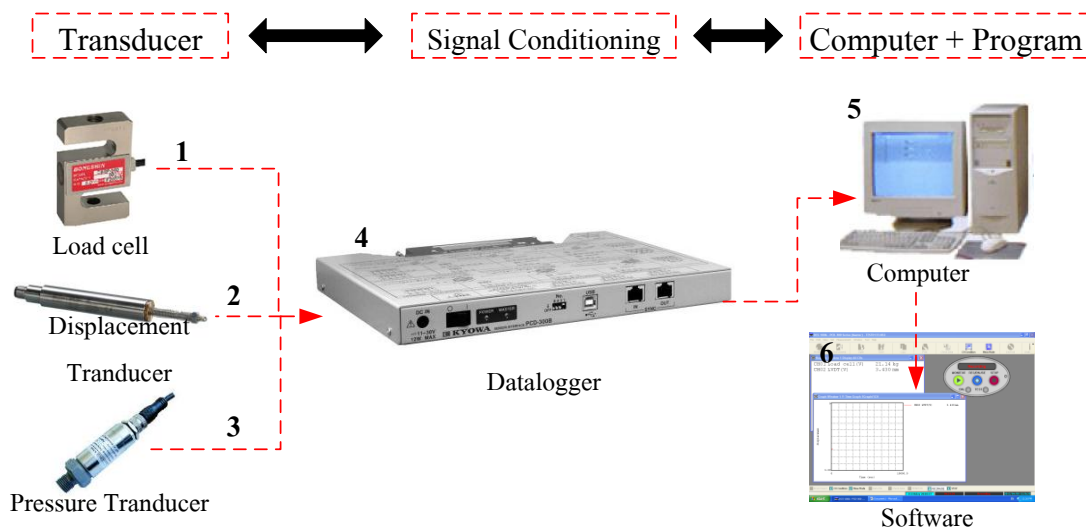
ภาพที่ 1.7 กลไกการให้น้ำหนักกดลงบนตัวอย่างทดสอบ



ภาพที่ 1.8 แสดงหลักการทำงานของเครื่องทดสอบการเฉือนแบบตรงอย่างง่าย

1.3 เครื่องมือตรวจวัดสำหรับเครื่องทดสอบ

อุปกรณ์ตรวจวัดที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะประกอบด้วยเครื่องมือตรวจวัดแรงค้ำน้ำหนักในมวลดิน (Pressure Transducer) อุปกรณ์วัดการเคลื่อนที่ที่จะประกอบไปด้วย LVDT ทั้งหมด 2 ตัว เซนเซอร์วัดแรง (load Cell) จะต่อเข้ากับเครื่องเก็บข้อมูล (Data Logger) และใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการประมวลผลและบันทึกผลข้อมูลผลตลอดการทดสอบดังภาพที่ 1.9



ภาพที่ 1.9 ระบบการเชื่อมต่ออุปกรณ์ตรวจวัด

1.3.1 โหลดเซลล์ (Load cell) ยี่ห้อ BONGSHIN รุ่น DBBP-500 ใช้สำหรับเป็นอุปกรณ์วัดค่าแรงในแนวตั้งและการวัดค่าแรงในแนวราบ โดยมีรายละเอียดดังภาพที่ 1.10

- Alloy tool steel construction for high accuracy.
- Electroless nickel plated for corrosion resistance.
- Fully sealed to IP67

SPECIFICATIONS

MODEL	DBBP
Rated capacity (R.C.)	20, 50, 100, 200, 500kg
	1, 2, 3, 5t
Rated output (R.O.)	3mV/V ± 0.5%
Non-linearity	≤ 0.03% R.O.
Hysteresis	≤ 0.03% R.O.
Non-repeatability	≤ 0.02% R.O.
Creep error	≤ 0.03% in 20min.
Zero balance	≤ 1% R.O.
Compensated temperature range	-10 ~ 70°C
Operating temperature range	-30 ~ 80°C
Temp. effect on rated output	≤ 0.03% LOAD/10°C
Temp. effect on zero balance	≤ 0.03% R.O./10°C
Terminal input resistance	350 Ohms ± 3.5 Ohms
Terminal output resistance	350 Ohms ± 5 Ohms
Insulation resistance (Min.)	2000 MOhms at 50V DC
Excitation voltage	10V (Recommended), 15V (Max.)
Electrical connection	05mm ² (22AWG x 4Core Shielded)
Protection class	meets IP 67
Safe overload	150% R.C
Ultimate overload	300% R.C

ORDERING INFORMATION

DBBP - ST

MODEL CAPACITY

DBBP 20, 50, 100, 200, 500kg

1, 2, 3, 5t

WIRING INFORMATION

RED : EXC. (+)

GREEN : SIG. (+)

WHITE : EXC. (-)

BLUE : SIG. (-)

BARE : GND.

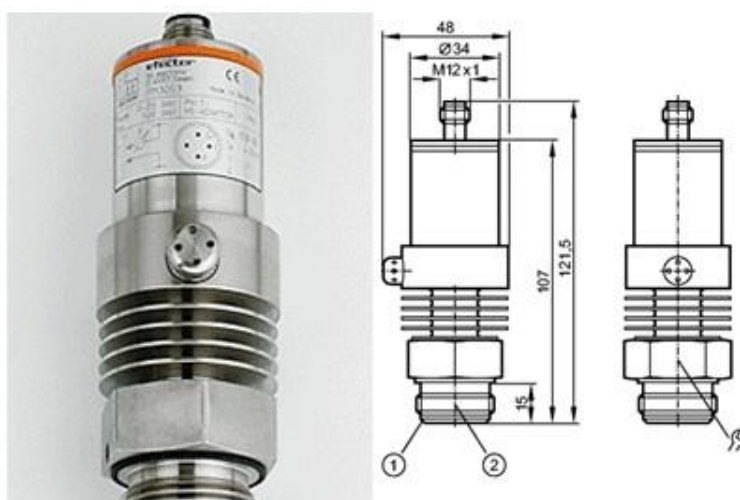
ภาพที่ 1.10 แสดงรายละเอียดคุณสมบัติของ Load cell

1.3.2 ทรานสดิวเซอร์วัดการเคลื่อนที่ (Displacement transducer) หรือ LVDT รุ่น LSC Transducer SER No.HS50/8922 เป็นอุปกรณ์ทางไฟฟ้าที่ใช้วัดค่าการเคลื่อนที่ ในการทดสอบจะใช้วัดค่าการเคลื่อนที่ในแนวตั้งได้ค่าการทรุดตัวของตัวอย่างดินทดสอบและวัดค่าการเคลื่อนที่ในแนวราบในขั้นตอนการเลื่อนตัวอย่างดิน โดยมีรายละเอียดดังภาพที่ 1.11



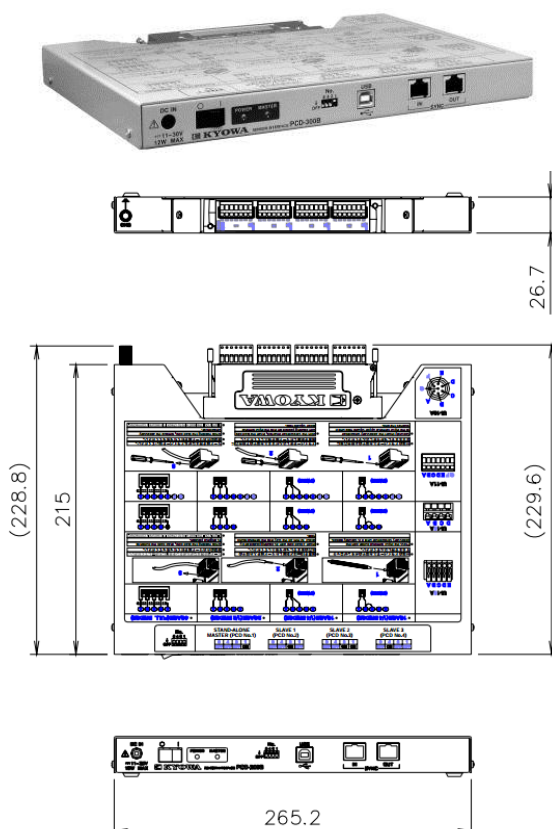
ภาพที่ 1.11 แสดงรายละเอียดคุณสมบัติของ LVDT

1.3.3 ทรานสดิวเซอร์วัดความดัน (Pressure transducer) รุ่น PM2057 PM-001BRES30-E-ZVG/US/ /P เป็นอุปกรณ์ที่แปลงค่าความดันไปเป็นสัญญาณทางไฟฟ้า ใช้สำหรับการวัดค่าแรงดันน้ำส่วนเกินที่เกิดขึ้น โดยมีรายละเอียดดังภาพที่ 1.12



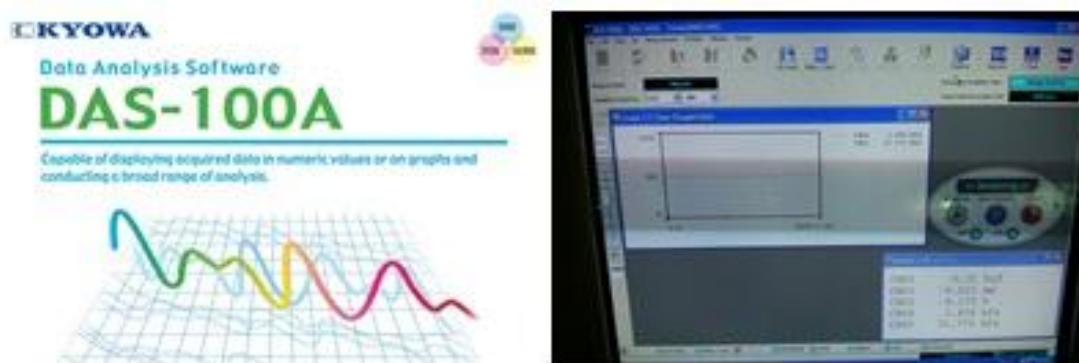
ภาพที่ 1.12 แสดงรายละเอียดคุณสมบัติของ Pressure transducer

1.3.4 อุปกรณ์เก็บบันทึก (Data logger) ยี่ห้อ KYOWA รุ่น PCD-300B คืออุปกรณ์ที่ใช้สำหรับเก็บบันทึกข้อมูลที่เป็นสัญญาณชนิดต่างๆ โดยอุปกรณ์เก็บบันทึกจะมีหน่วยความจำสำหรับเก็บค่าที่วัดได้ของสัญญาณตามช่วงเวลาการบันทึกที่กำหนดไว้โดยอัตโนมัติ โดยมีรายละเอียดดังภาพที่ 1.13



ภาพที่ 1.13 แสดงรายละเอียดคุณสมบัติของ Data logger ยี่ห้อ KYOWA รุ่น PCD-300B

1.3.5 ซอฟต์แวร์ DAS-100A เป็นอุปกรณ์ที่ได้จากการประมวลผลที่ส่งมาจาก อุปกรณ์เก็บบันทึกโดยซอฟต์แวร์มาพร้อมอุปกรณ์เก็บบันทึกของบริษัทผู้ผลิต โดยมีรายละเอียดดังภาพที่ 1.14



ภาพที่ 1.14 แสดงรายละเอียดคุณสมบัติของซอฟต์แวร์ DAS-100A

2. วิธีใช้งานเครื่องทดสอบการทดสอบการเนื้อมแบบตรงอย่างง่าย

การใช้งานเครื่องทดสอบการเนื้อมแบบตรงอย่างง่ายประกอบด้วย 2 ขั้นตอนใหญ่ๆคือ การเตรียมตัวอย่างและการทดสอบการเนื้อมแบบตรงอย่างง่าย





2.1 การเตรียมตัวอย่าง

การเตรียมตัวอย่างสำหรับการทดสอบ มีขั้นตอนการเตรียมตัวอย่างดังตารางที่ 2.1 ใช้เมนเบรนนุ่มตัวอย่างดินแล้วใช้สแตคริ่งในการควบคุมปริมาตรตัวอย่างดินระหว่างทดสอบ



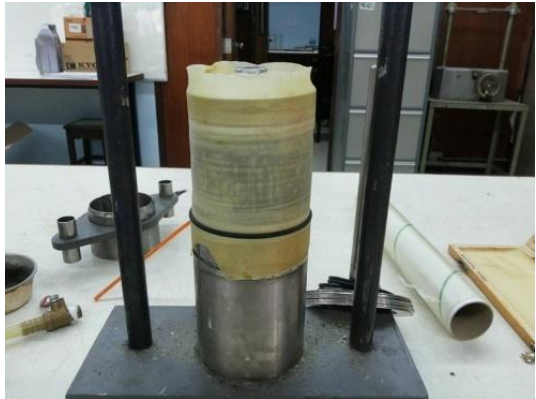
ตารางที่ 2.1 วิธีกรเตรียมตัวอย่างทดสอบ

ลำดับขั้นตอน	รูปภาพประกอบ
1) เริ่มจากการชั่งน้ำหนักแผ่นอะคิลิกแล้วนำตัวอย่างดินเหนียวมาวางบนแผ่นอะคิลิกยู่แทนทดสอบ	
2) นำอุปกรณ์ตัดดิน สวมเข้าเสาของแท่นเตรียมตัวอย่าง แล้วทำการกดลงบนตัวอย่าง	
3) ตัวอย่างดินที่ล้นจากขอบบนของอุปกรณ์ตัดดิน ใช้ลวดตัดดินส่วนที่ล้นออก	
4) นำท่อสแตนเลสกลางสวมบนอุปกรณ์ตัดดิน ภายหลังจากตัดดินส่วนล้นออกแล้วมาสวม	
5) นำอุปกรณ์ตัดดินที่มีตัวอย่างดินด้านในออก จากแท่นเตรียมตัวอย่างแล้วทำการกลับหัวอุปกรณ์ตัดดินแล้วสวมเข้าเสาของแท่นทดสอบ	
6) แล้วทำการตัดดินตัวอย่างที่ล้นจากขอบบนของอุปกรณ์ตัดดิน	

ตารางที่ 2.1 วิธีการเตรียมตัวอย่างทดสอบ (ต่อ)

ลำดับขั้นตอน	รูปภาพประกอบ
<p>7) นำอุปกรณ์ดันดินสวมเข้ากับเสาของแท่นเตรียมตัวอย่างแล้วทำการดันตัวอย่างดินที่อยู่ในอุปกรณ์ตัดดินออก</p>	
<p>8) เมื่อดันตัวอย่างดินออกแล้ว ทำการถอดอุปกรณ์ดันดินและอุปกรณ์ตัดดินออก</p>	
<p>9) นำตัวอย่างดิน ไปชั่งน้ำหนัก บนทีกค่า น้ำหนักเปียกของตัวอย่างทดสอบ แล้วทำการวัดเส้นผ่านศูนย์กลางและความสูงของตัวอย่าง ซึ่งโดยปกติขนาดของตัวอย่างจะเท่ากับขนาดของอุปกรณ์ตัดดิน</p>	
<p>10) หลังจากชั่งน้ำหนัก วัดขนาดของตัวอย่างแล้ว ทำการติดตั้งกระดาดรองและหินพรุน โดยที่ตัวอย่างดินกระดาดรองวางบนหินพรุนที่มีฐานล่างรองรับ(Bottom)</p>	

ตารางที่ 2.1 วิธีการเตรียมตัวอย่างทดสอบ (ต่อ)

ลำดับขั้นตอน	รูปภาพประกอบ
<p>11) นำยางหุ้มตัวอย่างสวมเข้ากับอุปกรณ์สวมยางหุ้มตัวอย่าง ดูดอากาศภายในของอุปกรณ์สวมยางออกเพื่อให้ยางแนบสนิท แล้วใช้ O-ring รััดหัวและท้ายของอุปกรณ์สวมยาง</p>	
<p>12) นำอุปกรณ์สวมยางหุ้มตัวอย่างสวมเข้าแทนเตรียมตัวอย่างแล้วทำคลียางมาหุ้มตัวอย่าง โดยทำการคลีส่วนล่างก่อนแล้วใช้ O-ring รััด ส่วนด้านบนนำฝาบน(Top cap) มาวางบนตัวอย่าง ดินแล้วทำการคลียางส่วนบนแล้ว</p>	
<p>13) นำอุปกรณ์สวมยางหุ้มตัวอย่างออกจากแท่นเตรียมตัวอย่าง</p>	

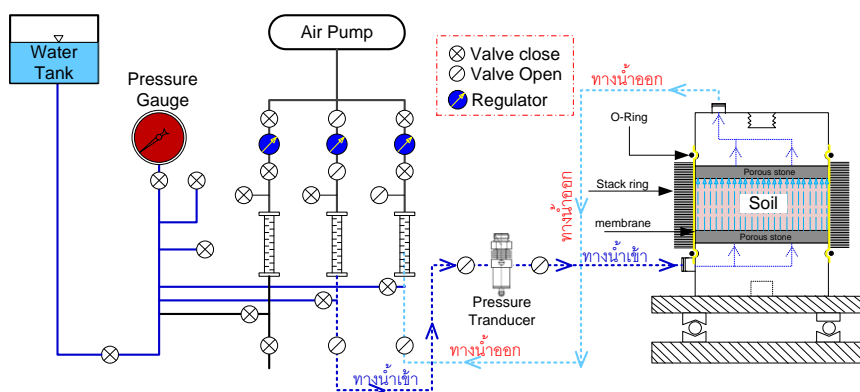
ตารางที่ 2.1 วิธีการเตรียมตัวอย่างทดสอบ (ต่อ)

<p>14) นำสแตคริ่งมาครอบตัวอย่างดินที่มียางหุ้มตัวอย่างแล้วใช้ O-ring รััดฝาบน(Top cap) ของตัวอย่าง</p>	
<p>15) นำอุปกรณ์ดันดินสวมเข้าแทนเตรียมตัวอย่างแล้วต่อกับฝาบน (Top cap) โดยเกลียวเพื่อไม่ตัวอย่างดินเกิดการรบกวน ขณะขันเกลียวข้อต่อระบายน้ำ</p>	
<p>16) นำตัวอย่างดินที่ถูกเตรียมไว้แล้วนำมาวางบนแท่นทดสอบของเครื่องทดสอบแรงเฉือนทางตรงอย่างง่าย</p>	

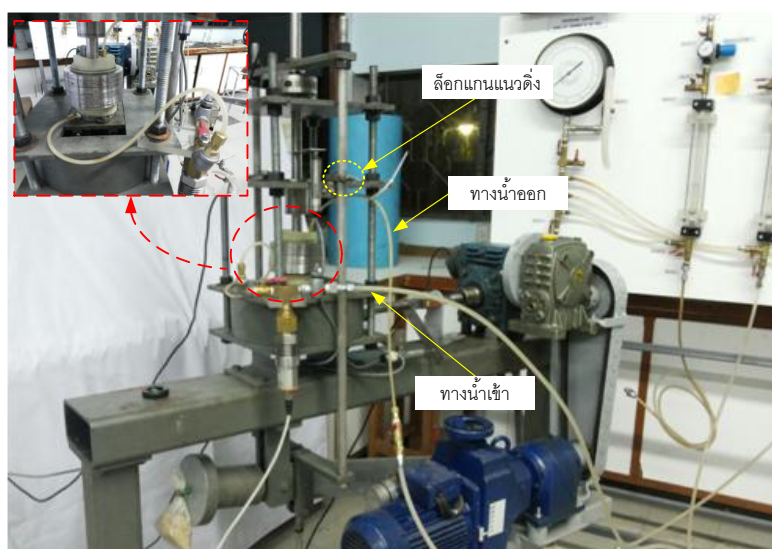
2.2 การทดสอบกำลังรับแรงเฉือนแบบตรงอย่างง่าย

2.2.1 ขั้นตอนการทำให้ตัวอย่างดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturation)

เริ่มจากการใส่น้ำหนักกดทับแนวตั้งเท่ากับ 5 kPa เพื่อไม่ให้แกนกดแนวตั้งยกตัวขึ้นพร้อมทั้งขันล็อกห้ามแกนแนวตั้ง แล้วทำการใส่แรงดันน้ำเข้าไปยังตัวอย่างดินทางรูระบายน้ำด้านล่าง (Bottom) ให้แรงดันน้ำวิ่งเข้าไปในตัวอย่างดินแล้วระบายออกทางรูระบายน้ำด้านบน (Top Cap) ของตัวอย่างดิน ดังภาพที่ 2.1 กระทำจนน้ำเข้าไปเต็มระบบ จากนั้นคลายล็อกแกนแนวตั้งปล่อยให้ น้ำหนักแนวตั้งกดตัวอย่างเพื่อเป็นการไล่อากาศของจากมวลดิน ที่ใช้เวลาประมาณ 5 ชั่วโมง จนเชื่อว่าตัวอย่างดินอิ่มตัวด้วยน้ำแล้วจึงปิดวาล์วแรงดันน้ำ



ดั่งภาพที่ 2.1 ภาพจำลองการทำให้ตัวอย่างดินอิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturation)

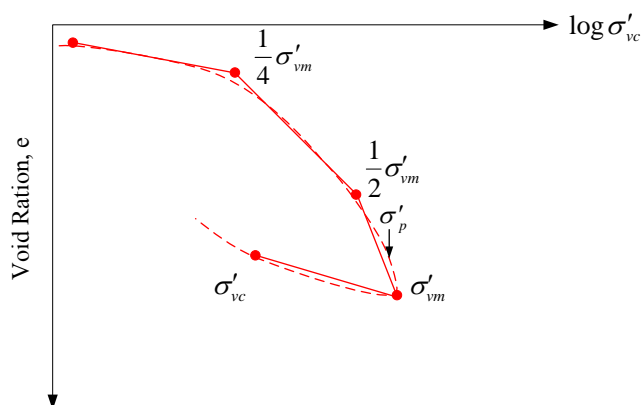


ภาพที่ 2.2 วิธีการทำตัวอย่างดินให้อิ่มตัวด้วยน้ำ (Saturation)

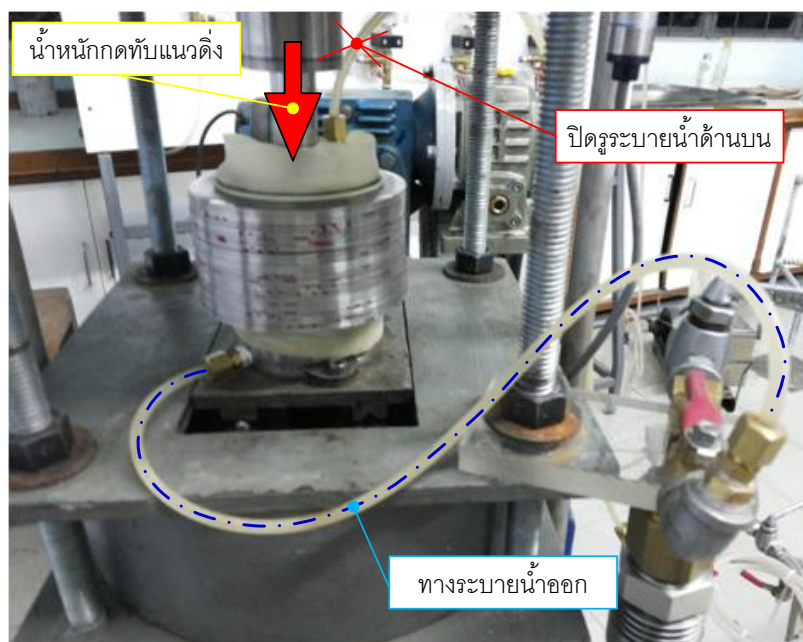
2.2.2 ขั้นตอนการอัดตัวคายน้ำ (Consolidation)

การอัดตัวคายน้ำของตัวอย่างทดสอบจะเพิ่มความเค้นในแนวตั้ง (σ'_{vc}) เป็นลำดับขั้น โดยมีอัตราส่วนค่า LIR=1 (Load increment ratio) จนกระทั่งมีค่าเท่ากับความเค้นสูงสุด (σ'_{vm}) ที่มีค่ามากกว่า (σ'_p) จากการทดสอบการอัดตัวคายน้ำแบบ 1 มิติ ในแต่ละลำดับขั้นของความเค้นจะใช้เวลาประมาณ 24 ชั่วโมง หรือจนกว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงแรงดันน้ำส่วนเกิน ภาพที่ 2.3

จากระบบขั้นตอนการทำให้ตัวอย่างดินอิ่มตัวด้วยน้ำกระบวนการอัดตัวคายน้ำกระทำโดยการใส่น้ำหนักกดแนวตั้งแล้วทำการปิดวาล์วระบายน้ำด้านบนเพื่อให้มีการระบายน้ำทางเดียว ดังภาพที่ 2.4 ระหว่างทำการอัดตัวคายน้ำทำการบันทึกข้อมูลค่าจาก Load cell (V) และ LVDT (V)



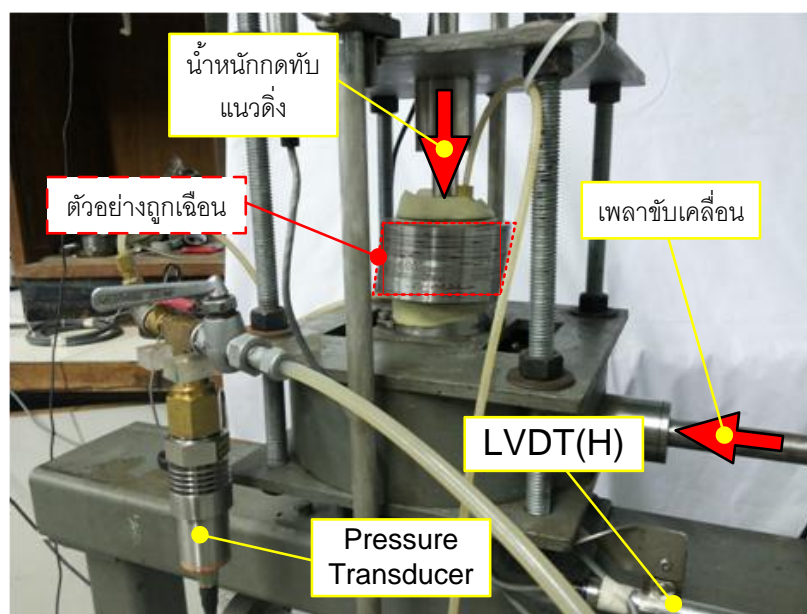
ภาพที่ 2.3 แสดงการจำลองการเพิ่มความเค้นในแนวตั้ง (σ'_{vc}) ของการทดสอบการอัดตัวคายน้ำ



ภาพที่ 2.4 แสดงการอัดตัวคายน้ำ

2.2.3 ขั้นตอนการเงื่อนไขตัวอย่าง

การเงื่อนไขตัวอย่างแบบตรงอย่างง่ายแบบทางเดียวโดยเครื่องมือทดสอบที่พัฒนา เริ่มจาก ปรับตั้งค่าความเร็วในการเงื่อนไขมอเตอร์ขับเคลื่อน ทำการปิดวาล์วระบายน้ำและทำการยึดบังคับไม่ให้แกนแนวตั้งเกิดการเปลี่ยนแปลงความสูงตัวอย่าง เปิดสวิตช์มอเตอร์ขับเคลื่อน ระหว่างทำการเงื่อนไขตัวอย่างบันทึกค่าจาก Load cell(V), Load cell(H), LVDT(H) และ Pressure transducer ทำการเงื่อนไขตัวอย่างจนมีอัตราความเครียดเงื่อนไขเท่ากับ 20 % ดังภาพที่ 2.5

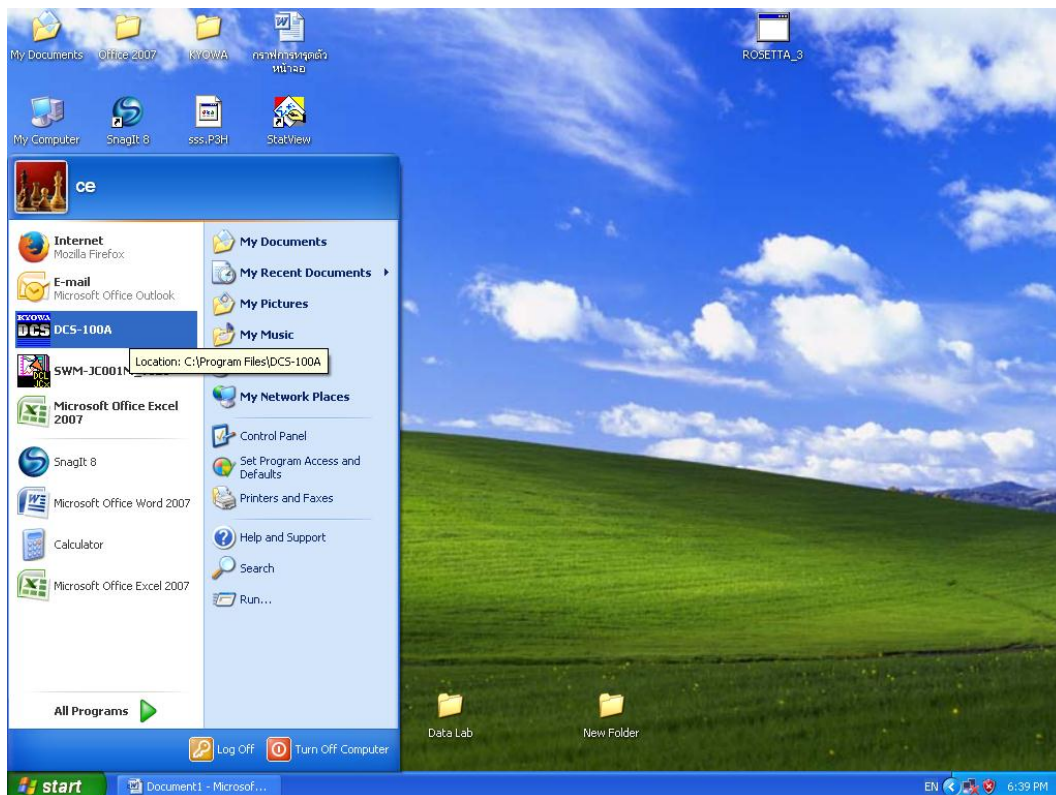


ภาพที่ 2.5 แสดงการเงื่อนไขตัวอย่างด้วยเครื่องมือทดสอบที่พัฒนาขึ้นมา

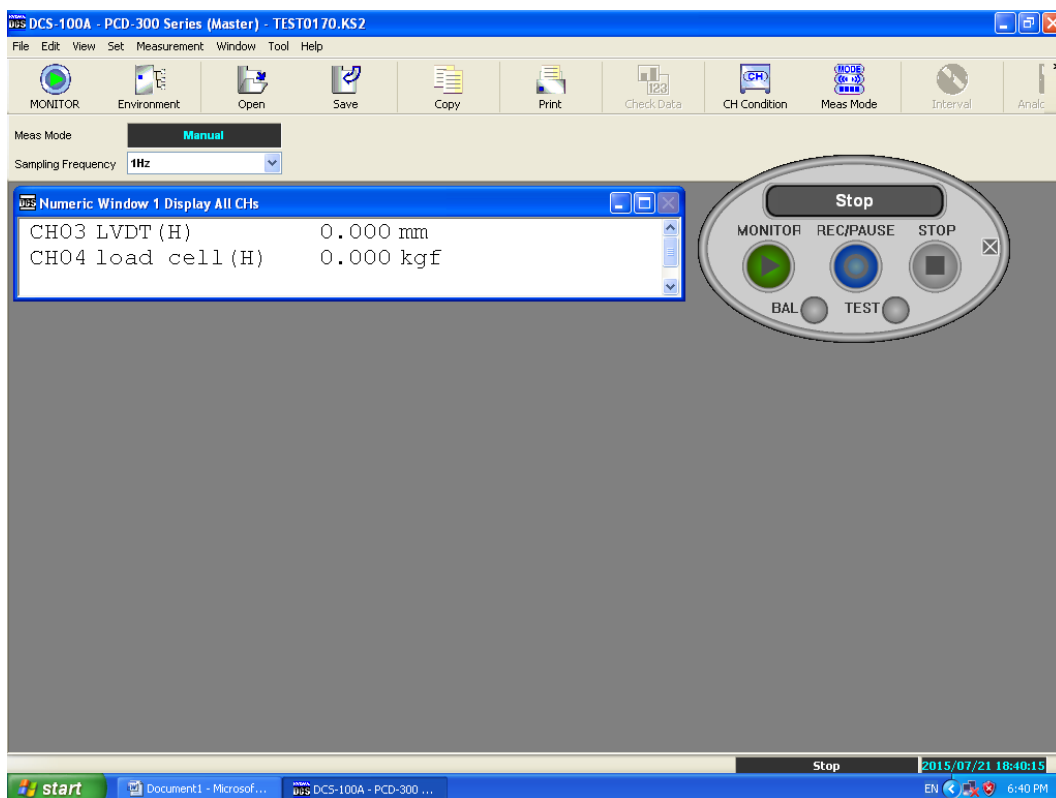
2.3 การใช้โปรแกรมซอฟต์แวร์ DAS-100A ในการบันทึกข้อมูลการทดสอบ

โปรแกรม DAS-100A เป็นซอฟต์แวร์ที่ถูกสร้างขึ้นมาเพื่อช่วยอำนวยความสะดวกในการบันทึกข้อมูลจากเครื่องมือวัดที่แปลงสัญญาณมาจาก data logger ของบริษัทผู้ผลิต ซึ่งมีขั้นตอนการใช้งานสำหรับการทดสอบการเงื่อนไขแบบตรงอย่างง่ายดังต่อไปนี้


ขั้นตอนที่ 1 เริ่มจากการเปิดโปรแกรม DAS-100A บน Window ขึ้นมาดังภาพที่ 2.6 จะปรากฏหน้าต่างดังแสดงในภาพที่ 2.7

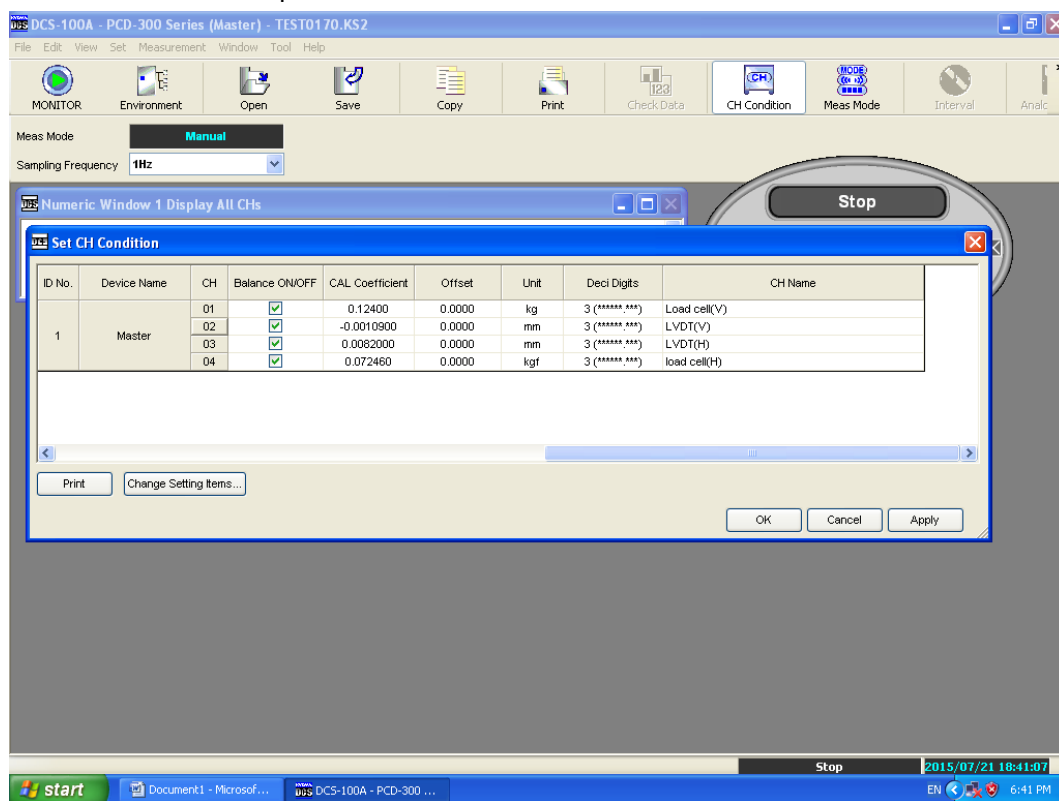


ภาพที่ 2.6 แสดงหน้าจอการเปิดโปรแกรม DAS-100A บน Window




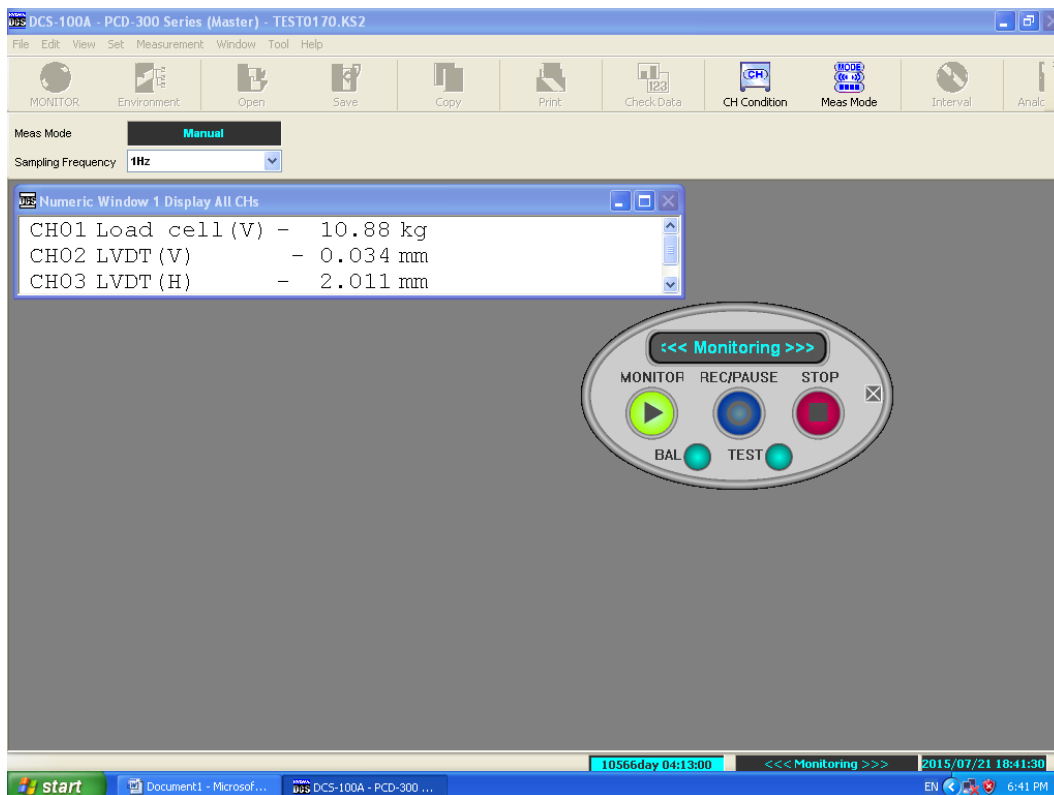
ภาพที่ 2.7 แสดงหน้าต่างของโปรแกรม DAS-100A

ขั้นตอนที่ 2 จากนั้นทำการตั้งค่าปรับแก้ที่ได้จากการทำการสอบเทียบเครื่องมือวัด โดยการกดปุ่ม  เพื่อตั้งค่าการบันทึกผลและกำหนดค่าปรับแก้ของเครื่องมือวัดแต่ละตัว จะปรากฏหน้าต่าง ดังภาพที่ 2.8 โดยค่าปรับแก้จะกำหนดในช่อง CAL Coefficient และกำหนดค่าอื่นตามที่ต้องการจากนั้นทำการกดปุ่ม “OK” เพื่อปิดหน้าต่าง Set CH Condition

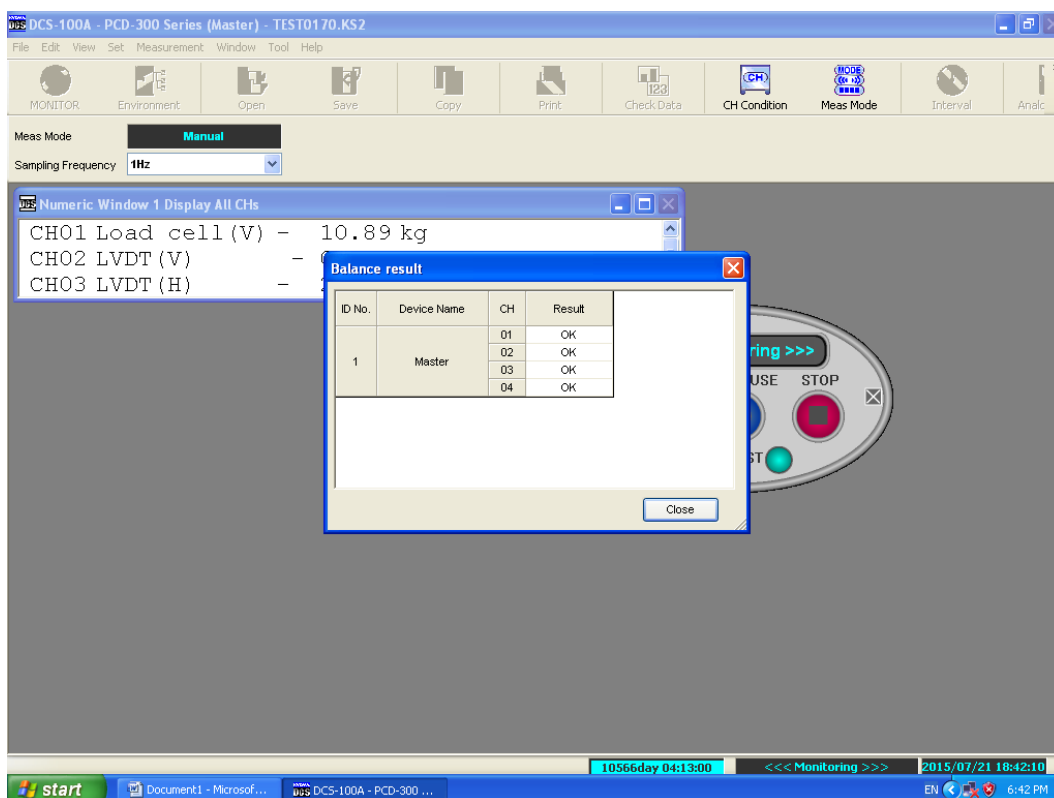


ภาพที่ 2.8 แสดงหน้าต่างของ Set CH Condition ของการตั้งค่าอุปกรณ์การวัด



ขั้นตอนที่ 3 ทำการกดปุ่ม “MONITOR” จะขึ้นไฟสีเขียวที่ปุ่ม  ดังภาพที่ 2.9 เป็นการเปิดรับสัญญาณจาก Sensor ของเครื่องมือวัด จากนั้นทำการตรวจสอบการเชื่อมต่อของ Sensor ของเครื่องมือวัดโดยการกดปุ่ม “BAL” ที่จอ MONITOR จะปรากฏหน้าต่าง Balance result ดังภาพที่ 2.10 โดยหน้าต่างนี้จะแสดงผลของการเชื่อมต่อ Sensor ของเครื่องมือวัดทุกตัวเพื่อให้แน่ใจว่าสัญญาณที่ส่งมามีความถูกต้องซึ่งจะปรากฏคำว่า “OK” ในช่องของ Result ของแต่ละ Chanel จากนั้นทำการกดปุ่ม “Close” เพื่อปิดหน้าต่าง Balance result

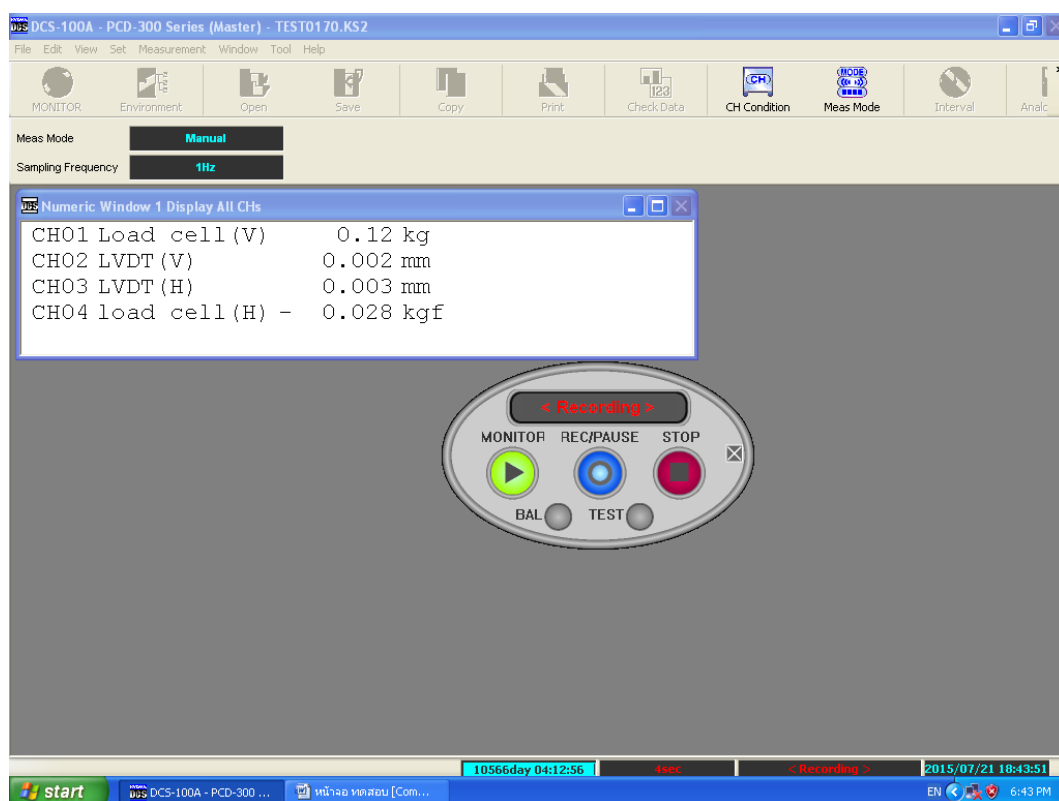


ภาพที่ 2.9 แสดงหน้าต่างหลังจากการกดปุ่ม “MONITOR”

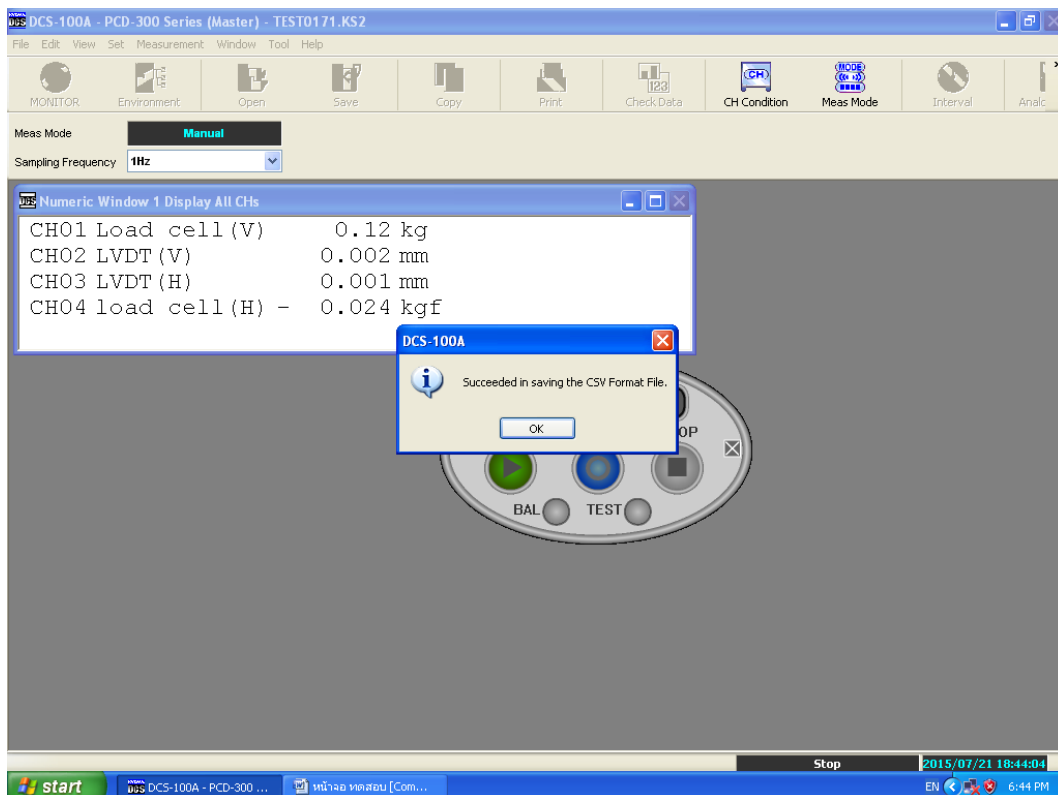


ภาพที่ 2.10 แสดงหน้าต่างของการ Balance result

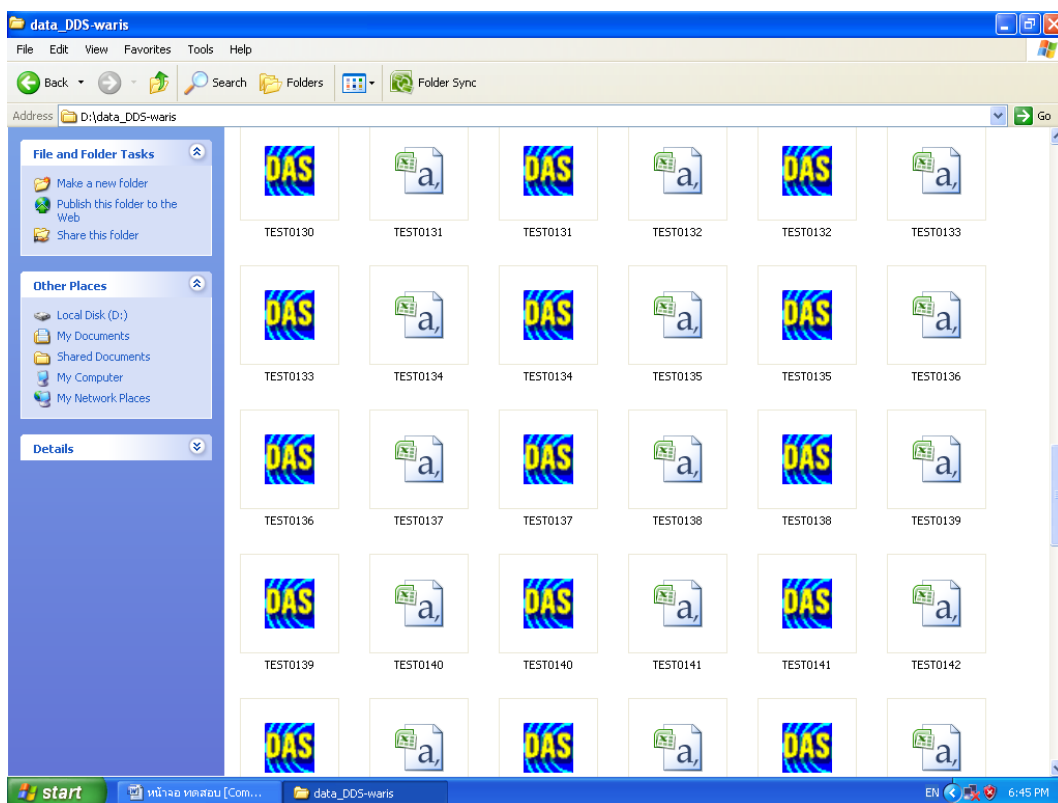
ขั้นตอนที่ 4 การบันทึกข้อมูลโดยบันทึกข้อมูลจะทำการบันทึกข้อมูล 2 ช่วงคือช่วงแรกบันทึกข้อมูลกระบวนการอัดตัวของตัวอย่าง โดยทำการบันทึก Load cell(V) และ LVDT(V) ส่วนช่วงที่สองทำการบันทึกข้อมูลกระบวนการเลื่อนตัวอย่าง โดยทำการบันทึก Load cell(V), Load cell(H), LVDT(H) และ Pressure transducer โดยขั้นตอนการบันทึกข้อมูลเริ่มจากการกดปุ่ม  “REC/PAUSE” ปุ่มสีน้ำเงินบนจอ MONITOR จะปรากฏดังภาพที่ 2.11 แล้วจะมีคำว่า “Recording” บนจอ MONITOR แสดงว่าเครื่องกำลังทำการบันทึกข้อมูลแล้ว เมื่อสิ้นสุดของการทดสอบให้กดปุ่ม  “STOP” ปุ่มสีแดงบนจอ MONITOR โปรแกรมก็จะทำการหยุดบันทึกข้อมูล ดังภาพที่ 2.12 ข้อมูลที่บันทึกจะถูกเก็บไว้ในแฟ้มที่กำหนดเบื้องต้น ซึ่งสามารถเรียกไฟล์ผลการทดสอบเปิดโดยโปรแกรม Microsoft Excel เปิดอ่านค่าได้ ดังภาพที่ 2.13 สามารถนำไปใช้ในการประมวลผลต่อไป



ภาพที่ 2.11 แสดงหน้าต่างของการกำลังทำการบันทึกข้อมูล



ภาพที่ 2.12 แสดงหน้าต่างของการบันทึกข้อมูลไปยังแฟ้มที่เก็บเรียบร้อยแล้ว



ภาพที่ 2.12 แสดงหน้าต่างของแฟ้มที่เก็บข้อมูลผลการทดสอบ